

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

David Tomiczek

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Modernizace pracoviště měření dynamických vlastností snímačů
teploty v laboratoři senzorů neelektrických veličin**

**Modernisation of Laboratory Experiment for Measurement of
Temperature**

2019

David Tomiczek

Zadání bakalářské práce

Student: **David Tomiczek**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma: Modernizace pracoviště měření dynamických vlastností snímačů teploty
v laboratoři senzorů neelektrických veličin
Modernisation of Laboratory Experiment for Measurement
of Temperature

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Řada úloh pro měření a testování je dnes vyhodnocována s využitím technologie Virtuální instrumentace. Jedná se o doplnění PC HW komponentou pro měření signálů a SW komponentou, která zajistí automatizaci úlohy či sofistikované zpracování signálu. Práce se zabývá komplexním řešením pracoviště měření teploty a zejména vývojem SW v LabVIEW pro automatizaci úlohy v laboratoři senzorů neelektrických veličin.

Body zadání:

1. Seznámení se s požadavky na úlohu měření teploty.
2. Návrh koncepce úlohy. (posuv termočlánků, řízení pece s ochranou před přehřátím)
3. Seznámení se s oblastí virtuální instrumentace a prostředím LabVIEW.
4. Navržení koncepce obslužného SW úlohy. (měření a ukládání dat do DB, řízení teploty pece, detekce ustálení teploty)
4. Implementace SW.
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9..
- [2] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 1st ed. Allendale: NTS Press, 2013, 701 s. ISBN 978-1934891087.
- [3] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabVIEW: advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 978-0-8493-3325-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

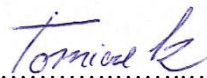


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30.4. 2019


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Petrovi Bilíkovi, Ph.D. a panu Ing. Davidovi Valovi za odbornou pomoc, konzultaci a řešení problematiky při vytváření této bakalářské práce. Za asistenci při sestavení konstrukce a mechanických prací patří mé poděkování technickému pracovníkovi panu Lumíru Malickému. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Dedkovi za využití jeho 3D tiskárny.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je modernizace stávajícího pracoviště měření dynamických vlastností snímačů teploty v laboratoři senzorů neelektrických veličin. Pro stěžejní komponenty konstrukce je využit 3D tisk. V obslužné aplikaci měřicí úlohy jsou implementovány algoritmy pro ukládání naměřených dat do MySQL databáze, PWM řízení teploty pece, detekci ustálených teplot, ovládání pohonu posunu termočlánků a ochrany pece před přehřátím. Pro vývoj SW bylo využito vývojové prostředí LabVIEW. Součástí práce je návrh a výroba řídicího modulu pro pohon posunu termočlánků a externího watchdog timeru spolu s programováním platformy Arduino Nano.

Klíčová slova

Měření teploty; Seebeckův jev; termodynamické vlastnosti; termočlánek; LabVIEW; virtuální instrumentace; časová konstanta; lineární pohon; DC motor; 3D tisk; watchdog timer; Arduino Nano; PWM řízení; MySQL databáze

Abstract

The aim of this bachelor thesis is the modernization of the current workplace of laboratory experiment for measurement of temperature. 3D printing is used for the main components of the design. Algorithms for storing measured data into MySQL database, PWM furnace temperature control, steady-state temperature detection, thermocouple shifting drive control and protecting the furnace from overheating are implemented in the service application. LabVIEW development environment was used for SW development. Bachelor thesis includes the design and manufacture of a control module for thermocouple drive and external watchdog timer together with Arduino Nano programming.

Keywords

Measurement of temperature; Seebeck effect; thermodynamic properties; thermocouple; LabVIEW; virtual instrumentation; time constant; linear propulsion; DC motor; 3D print; watchdog timer; Arduino Nano; PWM control; MySQL database

Obsah

1	Seznam použitých symbolů a zkratek	11
2	Seznam ilustrací a seznam tabulek	12
3	Úvod	13
4	Základní pojmy z oboru měření teplot	14
4.1	Teplota.....	14
4.2	Teplotní stupnice	14
4.3	Dynamické vlastnosti	15
5	Termočlánky.....	16
5.1	Seebeckův jev.....	16
5.2	Typy termočlánků.....	19
5.3	Konstrukce termočlánků.....	20
6	Chyby při měření.....	22
6.1	Vliv teploty srovnávacích konců na výsledek měření a její korekce.....	22
6.2	Nevhodné kompenzační vedení.....	23
6.3	Ohmický odpor měřicího řetězce	23
6.4	Odvod tepla z měřicích konců.....	24
6.5	Přechodové odpory.....	24
6.6	Chybné zabudování termočlánků a působení jímky	24
7	Úvod do LabVIEW	25
7.1	National instruments hardware.....	25
8	Ochranný prvek watchdog timer	26
9	MySQL databáze.....	26
10	Realizační část.....	27
11	Návrh řešení automatického posunu termočlánků do pece	27
11.1	Návrh řešení 1	27
11.2	Návrh řešení 2	28
11.3	Návrh řízení motoru	30
11.5	Deska plošného spoje pro řídicí modul	32
12	Ochrana pece před přehřátím.....	33
12.1	Deska plošného spoje pro watchdog timer.....	34
12.2	Arduino Nano program	35
13	Obslužná aplikace.....	36
13.1	Řízení motoru pohonu termočlánků	36
13.2	Detekce ustálení měřených teplot.....	37

13.3	PWM řízení	38
13.4	Ukládání dat do databáze.....	38
14	Konstrukce.....	39
14.1	3D tisk	42
15	Závěr.....	45
	Literatura	46

1 Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotky	Význam
E	V	Elektromotorické napětí
I	A	Elektrický proud
R	Ω	Elektrický odpor
T, t, θ	$^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$, K	Teplota
U	V	Elektrické napětí
τ	s	Časová konstanta
k_f	-	Korekční faktor
e	-	Eulerovo číslo
hFE	-	Zesilovací činitel tranzistoru
Δ	-	Změna, rozdíl
AI	-	Analog Input
AO	-	Analog Output
DI	-	Digital Input
DO	-	Digital Output
PWM	-	Pulse Width Modulation
USB	-	Universal Serial Bus
V_{CC}	-	Napájecí napětí
GND	-	Uzemnění
SSR	-	Solid state relay
UDL	-	Universal Data Link
ODBC	-	Open Database Connectivity
LED	-	Light Emitting Diode
DC	-	Střídavý
SW	-	Software
HW	-	Hardware
NO	-	Normally opened
NC	-	Normally closed
C	-	Common

2 Seznam ilustrací a seznam tabulek

Seznam ilustrací

Obr. 1 Měřicí úloha před modernizací	13
Obr. 2 Vyhodnocení časové konstanty v soustavě 1. řádu	15
Obr. 3 Uspořádání obvodu při vytváření termoelektrického napětí	16
Obr. 4 Měřicí řetězec termočlásku	20
Obr. 5 Konstrukční provedení měřících spojů	21
Obr. 6 Konstrukce termočlásku	21
Obr. 7 Smyčka „for“ pro generování náhodných čísel	25
Obr. 8 National Instruments hardware	25
Obr. 9 Blokové schéma modernizované měřicí úlohy	27
Obr. 10 Návrh řešení 1	28
Obr. 11 Koncept řešení	29
Obr. 12 Elektrické schéma řídicího modulu	30
Obr. 13 Osazovací schéma řídicího modulu	32
Obr. 14 Řídicí modul	32
Obr. 15 Blokové schéma ochrany pece	33
Obr. 16 Elektrické schéma externího watchdog timeru	34
Obr. 17 Osazovací schéma externího watchdog timeru	34
Obr. 18 Externí watchdog timer	35
Obr. 19 Zapojení pull-down rezistoru	35
Obr. 20 Struktura obslužné aplikace	36
Obr. 21 Princip činnosti algoritmu pro indikaci ustálených teplot	37
Obr. 22 Blokové schéma PWM řízení pece	38
Obr. 23 Blokové schéma ukládání dat do databáze	38
Obr. 24 Průřez ložiska	39
Obr. 25 Pružná spojka	39
Obr. 26 Vodicí tyč	40
Obr. 27 Profil ozubeného řemenu HTD 3M	40
Obr. 28 Uzavřený linearset	40
Obr. 29 Řemenice HTD s upevňovacím šroubem	41
Obr. 30 DC motor série SGC270 s čelní převodovkou	41
Obr. 31 Základna	42
Obr. 32 Domeček pro ložisko	42
Obr. 33 Protikus k řemenu	43
Obr. 34 Uchycení motoru	43
Obr. 35 Modernizovaná měřicí úloha	44

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty ustáleného stavu v procentech pro násobky τ	16
Tab. 2 Seebeckova řada [6]	17
Tab. 3 Seebeckovy koeficienty [10]	18
Tab. 4 Typy termočlásků a jejich vlastnosti [3]	19
Tab. 5 Korekční tabulka [11]	22

3 Úvod

V této bakalářské práci se zabývám teoretickým rozбором měření teploty pomocí termoelektrických článků, jejich konstrukcí a chybami měření. Na začátku definuji základní pojmy a definice z oboru měření teplot, který tvoří širokou oblast postupů a metod. Zaměřuji se na termoelektrický jev a jeho využití při měření teploty.

V praktické části práce je mým cílem modernizace měřicího pracoviště v laboratoři senzorů neelektrických veličin. V této kapitole se zabývám vhodným návrhem řešení automatického posunu termočlánku do pece zejména z hlediska ceny, efektivity a pohodlnosti obsluhy, přičemž vycházím ze stávající konstrukce. Implementoval jsem obslužnou SW aplikaci včetně ukládání dat do MySQL databáze, detekce ustálených teplot a řízení teploty pece pomocí pulsní šířkové modulace. Ochranu pece před přehřátím řeším pomocí externí periferie watchdog timer, která běží na platformě Arduino Nano. Pro externí watchdog timer a řídicí modul pohonu pro posun termočlánku jsem si vyrobil desku plošného spoje. Pro některé konstrukční komponenty jsem využil 3D tisk. Na obr. 1 je fotografie měřicí úlohy před modernizací.



Obr. 1 Měřicí úloha před modernizací

4 Základní pojmy z oboru měření teplot

Pro pochopení problematiky měření teploty je zapotřebí si definovat některé vztahy, pravidla a základní pojmy z této oblasti. Vysvětlím pojem teplota, její stupnice a vzájemné přepočty. Definuji pojem přechodová charakteristika, se kterou úzce souvisí také časová konstanta, přičemž popisují způsoby jejího vyhodnocení.

4.1 Teplota

Teplota je základní stavová veličina soustavy SI s jednotkou Kelvin [K], která určuje stav termodynamické rovnováhy – stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Často se také setkáváme s vedlejší jednotkou stupeň Celsia [°C] nebo méně často také v stupních Fahrenheita [°F].

4.2 Teplotní stupnice

Termodynamická stupnice

Základní jednotkou je kelvin [K]. Kelvin je definován jako zlomek $\frac{1}{273,16}$ absolutní teploty trojného bodu vody, který nastává při tlaku 610,6 Pa a teplotě 0,01°C. Tato teplota tedy odpovídá 273,16 K [2].

Fahrenheitova stupnice

Na Fahrenheitově stupnici je rozsah od bodu mrazu po bod varu 32 – 212, zatímco na Celsiově stupnici je to 0-100. Můžeme tedy říct, že jsou v poměru 1:1,8 s rozdílem 32, z čehož vyplývá vztah (1)

$$t(^{\circ}F) = 1,8t + 32 \quad (1) [1]$$

kde

$t(^{\circ}F)$ = teplota ve stupních Fahrenheita

t = teplota ve stupních Celsia

Celsiova stupnice

Víme, že 0°C odpovídá 273,15 K. Poměr stupňů Celsia ku Kelvinům je 1:1. Z toho vyplývá vztah (2)

$$t(^{\circ}C) = T - T_0 = T - 273,15 K \quad (2) [1]$$

kde

$t(^{\circ}C)$ = teplota ve stupních Celsia

T = teplota v Kelvinech

T_0 = 0°C v Kelvinech

4.3 Dynamické vlastnosti

Dynamické vlastnosti termočlánků je nutné znát pro analýzu a syntézu regulačních a měřicích systémů. Výstupní signál $Y=f(t)$ by měl sledovat teplotu t s minimálním zkreslením. Dynamické chování lze popsat rovnicemi prvního, druhého nebo i vyššího řádu.

Přechodový jev

Přechodový jev je děj, při kterém dochází ke změně veličiny z jednoho ustáleného stavu do druhého, přičemž se mění energie soustavy. Nejznámější příklad tohoto jevu je změna stavu v RC obvodech.

Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika je odezva na jednotkový skok teploty nebo odezva na změnu fyzikální veličiny (teploty) konstantní rychlostí – rychlostní charakteristika. Tímto způsobem sledujeme dynamické vlastnosti graficky. Na obr. 2 je znázorněno vyhodnocení časové konstanty v přechodové charakteristice 1. řádu.

Rovnice pro přechodovou charakteristiku 1. řádu

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{MAX} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3) [3]$$

kde

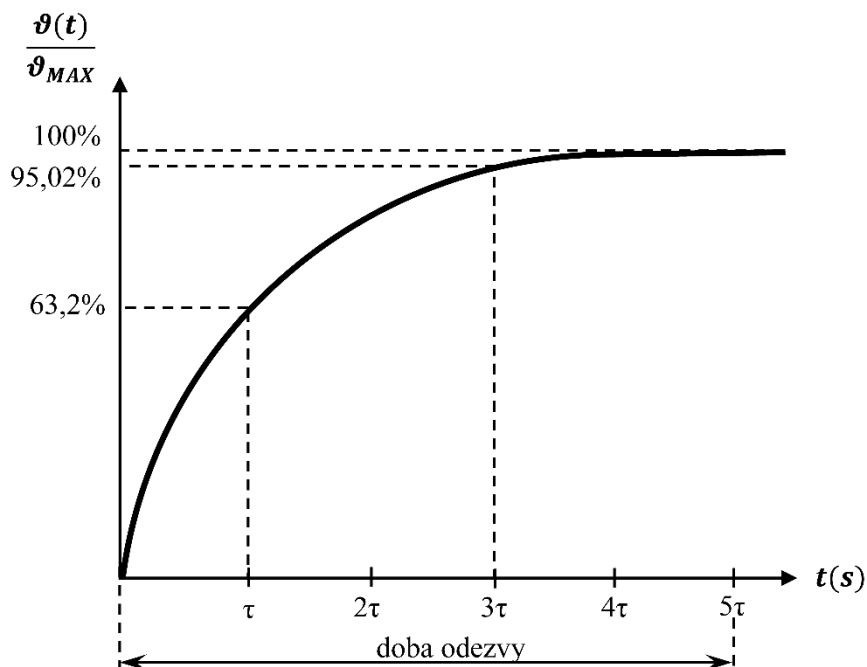
ϑ = teplota v čase $t(s)$

ϑ_{MAX} = maximální ustálená teplota v čase $t=6,909\tau$

t = čas (s)

τ = časová konstanta

Pozn.: v této kapitole je teplota označena písmenem „ ϑ “, přičemž původní označení „ t “ je zde čas (s).



Obr. 2 Vyhodnocení časové konstanty v soustavě 1. řádu

Časová konstanta τ je doba, za kterou odezva na skokovou změnu dosáhne 63,2 % ustálené hodnoty. Teoreticky přechodový děj odezní za nekonečně dlouhý čas. V praxi to jsou hodnoty v tab. 1.

Tab. 1 Hodnoty ustáleného stavu v procentech pro násobky τ

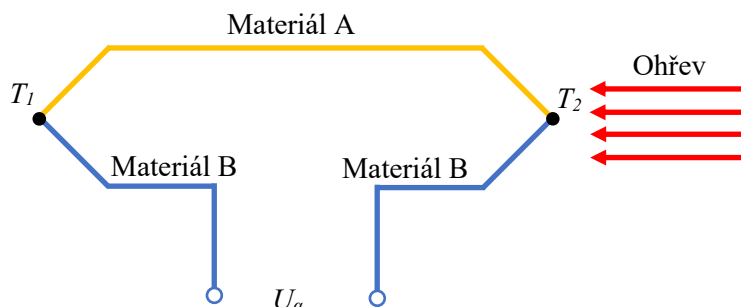
čas	% ustáleného stavu
τ	63,2
3τ	95,02
$4,606 \tau$	99
$6,909 \tau$	99,99

5 Termočlánky

Termočlánky patří mezi nejlevnější snímače teploty. Pracují na principu termoelektrického jevu, přičemž první zmínka o tomto jevu byla uvedena již roku 1758 ruským vědcem Epinusem. Ve většině zdrojích se uvádí, že termoelektrický jev byl objeven roku 1821 německým fyzikem Seebeckem, podle něhož je pojmenován Seebeckův jev. V této kapitole popisují princip Seebeckova jevu, typy termočlánků a jejich konstrukci.

5.1 Seebeckův jev

Podstatou Seebeckova jevu je převod tepelné energie na elektrickou. Princip činnosti spočívá v rozdílu teplot spojů dvou různých kovů znázorněných na obr. 3. Mějme obvod složený z kovu A a kovu B, které jsou spojeny dvěma body. Mají-li tyto body rozdílnou teplotu, prochází obvodem elektrický proud. Při rozpojení obvodu v jednom místě jsme schopni na jeho koncích měřit elektrické napětí U_a . Takové napětí se nazývá termoelektrické nebo také Seebeckovo napětí a je úměrné rozdílu teplot T_1 , T_2 v místech spojů, které jsou nazývány jako měřící konec a srovnávací (studený) konec. Velikost toho napětí nezávisí nejen na teplotním rozdílu bodů, ale i na použitých kovech. Pro termoelektrické napětí se používá také veličina elektromotorické napětí E [V], v zahraniční literatuře je označováno jako emf [V] (electromotive force).



Obr. 3 Uspořádání obvodu při vytváření termoelektrického napětí

Již výše zmíněný Seebeck zkoumal vlastnosti různých kovů a vytvořil tzv. Seebeckovou řadu. V tab. 2 jsou uvedeny pouze čisté kovy, avšak tento jev lze pozorovat mezi různými polovodiči nebo kovem a polovodičem, viz tab. 4 v kapitole 5.2 Typy termočlánků.

Tab. 2 Seebeckova řada [6]

+	Sb	Fe	Zn	Ag	Au	Sn	Pb	Hg	Cu	Bi	-
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---

Termočlánkem, tvořeným kterýmikoli dvěma kovy z tabulky Tab. 2 Seebeckova řada, poteče elektrický proud přes studený konec směrem od kovu, který je v tabulce více vpravo, do teplého konce kovu více vlevo v tabulce. Takto vzniklý elektrický proud bude tím vyšší, čím vyšší bude vzájemná vzdálenost kovů v Seebeckově řadě.

Chceme-li dosáhnout téměř lineární závislosti mezi termoelektrickým napětím a rozdílem teplot, musejí být teplotní rozdíly T_1 a T_2 v řádech desítek stupňů Celsia. Pro vyšší rozdíly teplot se do rovnice (4) přidávají další členy s vyššími řády.

Pro výpočet Seebeckova (termoelektrického) napětí při malém teplotním rozdílu (desítky °C) platí přibližně lineární vztah (4)

$$U_{\alpha} = \alpha_{12}(T_1 - T_2) \quad (4) [4]$$

kde

U_{α} = velikost Seebeckova napětí

α_{12} = Seebeckův koeficient, závisí vždy na dvojici materiálů (dvou kovů nebo dvou polovodičů)

T_1, T_2 = teploty na měřicím a srovnávacím konci

Seebeckův koeficient dosahuje velikosti řádově 10^{-6} až 10^{-5} pro kovy a 10^{-5} až 10^{-3} pro polovodiče. Seebeckovo napětí bývá v řádech jednotek až desítek milivoltů.

Obecně pro elektromotorické napětí E_{AB} a absolutní teploty spojů platí experimentálně zjištěný vztah (5)

$$E_{AB} = (a_A - a_B)(T_2 - T_1) + 0,5(b_A - b_B)(T_2 - T_1)^2 \quad (5) [10]$$

kde

E_{AB} = elektromotorické napětí [mV]

a, b = Seebeckovy koeficienty

T_1, T_2 = teploty na spojích kovů

A, B = materiál

Seebeckovy koeficienty pro různé kovy

Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu.

Tab. 3 Seebeckovy koeficienty [10]

Kov	a [$\mu\text{V/K}$]	b [$\mu\text{V/K}^2$]
Antimon	35,6	0,145
Bismut	-74,4	0,032
Konstantan	-38,1	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,1	-3,02
Platina	-3,03	-3,25
Železo	16,7	-0,0297

Koeficienty a, b v tab. 3 jsou mimo jiné závislé na přesném složení daného materiálu a také na jeho struktuře. Z tohoto důvodu musíme hodnoty z tabulky brát s rezervou.

5.2 Typy termočlánků

Výroba termočlánků a použití jednotlivých párů materiálů podléhá světové normalizaci. Určité páry byly vybrány tak, aby splňovaly určitá kritéria podle aplikace. Jsou to především tyto vlastnosti:

- přijatelná nelinearita závislosti Seebeckova napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah
- odolnost proti korozi
- odolnost proti chemickým vlivům a ionizačnímu záření
- dlouhodobá stabilita charakteristiky $E=f(\Delta t)$
- velký rozsah pracovních teplot
- snadná výroba a cena

Je nutné podotknout, že žádný z používaných materiálů nesplňuje tyto vlastnosti v plném rozsahu.

Tudíž se používá mnoho typů termočlánků dle potřeby.

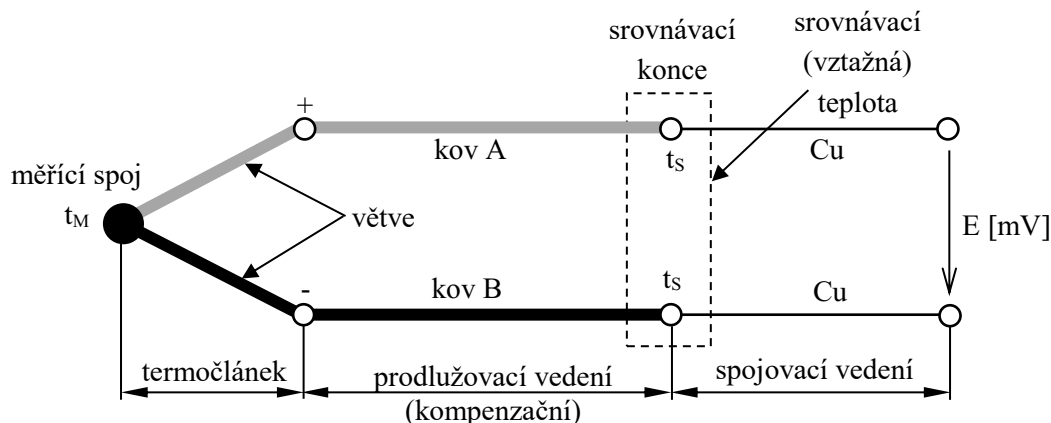
Přehled vlastností a použití jednotlivých typů termočlánků je stručně popsán v tab. 4.

Tab. 4 Typy termočlánků a jejich vlastnosti [3]

Typ	Složení	Vlastnosti a použití
K	NiCr-NiAl	vhodný pro oxidační a inertní atmosféru, je necitlivý pro neutronový tok, není vhodný měření ve vakuu
T	Cu-CuNi	nejlepší termočlánek pro nízké teploty kryogenní aplikace, v redukční, oxidační atmosféře, ve vakuu ho lze použít až do teploty 700°C
N	NiCrSi-NiSiMg	velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C, vhodný pro cyklické změny teploty a dále je vhodný pro jadernou energetiku, neboť je odolný vůči neutronovému toku
J	Fe-CuNi	vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru a vakuum, v redukční atmosféře ho lze použít bez ochranného krytí
E	NiCr-CuNi	má nejvyšší hodnotu Seebeckova koeficientu, je vhodný pro měření ve vakuu a ve středně oxidační atmosféře, kde se da využít bez ochranného krytí
R	PtRh13-Pt	je používán pro měření vysokých teplot až do 1780 °C, odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení
S	PtRh10-Pt	vlastnosti jsou stejné jako u typu R
B	PtRh30-PtRh6	použitelný až od teploty 100 °C, přičemž v rozsahu do 300 °C má velmi malou citlivost, vlastnosti obdobné jako u typu R a S, při teplotách nad 1200 °C je stabilnější
G	W-WRh	vhodný pro extrémně vysoké teploty a k použití v oxidační i inertní atmosféře, vakuu i ve vodíku, nevhodné použití pro rozsahy teplot pod 400 °C, chemicky stabilní
C	WRh5-WRh26	má obdobné vlastnosti jako typ G

5.3 Konstrukce termočlánků

Konstrukce je typická téměř pro všechny typy termočlánků. Hlavním poznávacím znamením termočlánku jsou dva různé kovy nebo slitiny, které jsou vzájemně spojeny na jednom konci dohromady. Základní měřicí řetězec je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Měřicí řetězec termočlánku

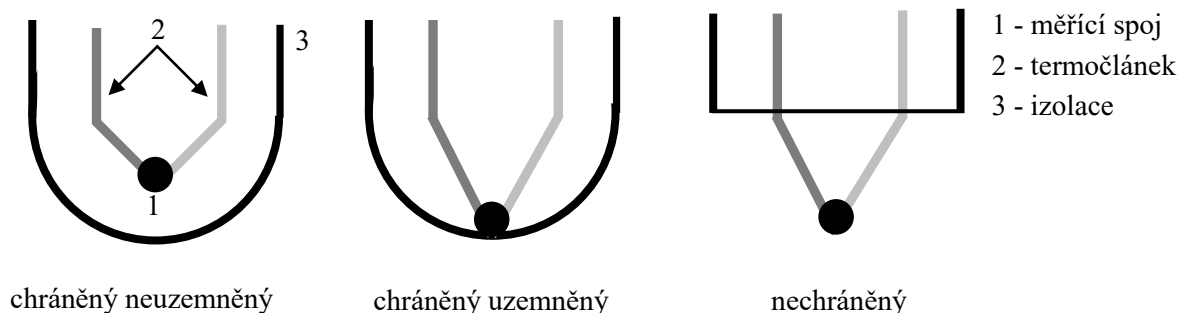
- měřicí spoj s teplotou t_M je bod, kterým přímo měříme teplotu v požadovaném místě
- kovy A a B jsou dvojice materiálů daného typu termočlánku
- srovnávací konec (teplota t_s) je teplota svorek spojovacího vedení
- vztažná teplota je teplota srovnávacích spojů, která se používá ke stanovení základních hodnot termoelektrického napětí, pro přesná měření se srovnávací spoj udržuje na referenční teplotě pomocí termostatu, v jiném případě má teplotu okolí nebo měřicího přístroje
- prodlužovací nebo také termočlánekové vedení je vedení v podobě kabelu a je ze stejného materiálu jako větve termočlánku
- kompenzační vedení má funkci prodlužovacího vedení, ale je vyrobeno z jiných materiálů než jsou větve termočlánku - jsou méně nákladné, přičemž koeficient těchto materiálů musí v omezeném teplotním rozsahu (do 200 °C) být totožný jako u větví termočlánku, tedy nedochází k přidání dalšího termočlánku do obvodu a výstupní termoelektrické napětí se s přidáním tohoto vedení nemění
- spojovací vedení je v provedení měděného vodiče

Pozn.: Termín kompenzační zde neznamená kompenzaci.

Měřicí spoj je tvořen dvěma různými kovy se stejným průměrem, které mohou být spojeny mechanicky, pájením nebo svařením. Průměr termoelektrických vodičů se pohybuje mezi 0,5 mm až 3,5 mm. Pro nižší teploty se používají vodiče s průměrem v řádech desítek μm . Spoje u drátových termočlánků mohou být chráněné uzemněné nebo neuzemněné nebo nechráněné. Rozdíly těchto provedení jsou jasně zřetelné na obr. 5.

Nejjednodušším konstrukčním provedením jsou termočlánky nechráněné. Konce vedení musí být dokonale očištěny a pevně spojeny jedním bodem. Jak již z názvu vyplývá, měřicí spoj není ničím chráněný, což s sebou přináší jistá omezení při výběru měřeného média. Měření teploty kapalin je tedy velice nevhodné, neboť jsou dráty vystaveny vysokému riziku koroze.

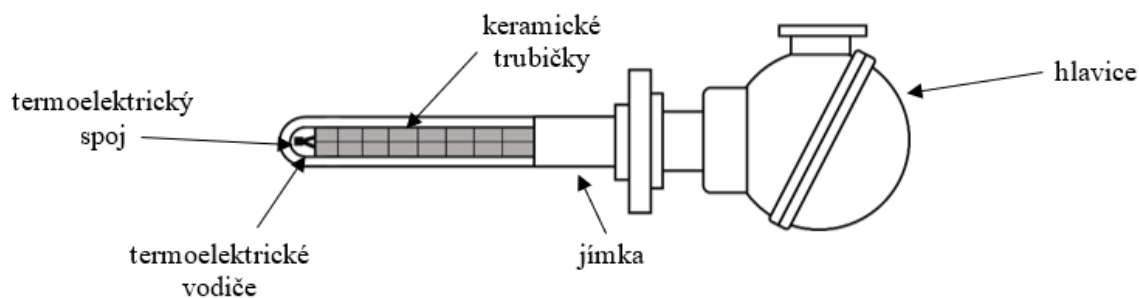
Zcela nutné je vyhnout se měření povrchu živých vodičů, které slouží k uzemnění obvodu. Použití těchto termočlánků je zejména vhodné pro plynná média. Výhodou je rychlá odezva a malé rozměry.



Obr. 5 Konstrukční provedení měřících spojů

Chráněné termočlánky mají izolovaný měřicí spoj. Uzemněné provedení má spoj pevně spojen s pláštěm. Má rychlejší časovou konstantu, než neuzemněný spoj, protože průchod tepla skrze izolaci je rychlejší, avšak je citlivý na uzemněné měřicí elektrické smyčky. Neuzemněný spoj je oddělen od stěny pláště pomocí izolace.

Drátové termočlánky – jsou tvořeny dvěma kovovými větvemi, uloženy v izolačních trubičkách. Jako izolační trubičky se používají keramické trubičky. Ochranné jímky pro termočlánky mohou být keramické nebo kovové. Konstrukce je znázorněna na obr. 6.



Obr. 6 Konstrukce termočládku

Plášťové termočlánky – termoelektrické vodiče jsou uloženy v kovovém plášti ve tvaru trubky. Vodiče jsou v plášti izolovány zhutnělou práškovou minerální hmotou z MgO nebo Al_2O_3 . Vnější průměr pláště se vyrábí v rozsahu od 0,1mm až do 8 mm. Samotný plášť je vyroben z korozi-vzdorných ocelí, z chromoniklových slitin (Inconel, Incoloy, Hastelloy, Nicrobell) nebo taky ze slitiny PtRh10 pro vysoké teploty, přičemž se vyrábí až do délky 200 m.

6 Chyby při měření

Chyby při měření se vyskytují téměř u všech měření fyzikálních veličin. Pokud známe zdroje těchto chyb, jsme schopni je potlačit a uvést do požadovaných mezí (tolerancí), které udává norma ČSN EN 60584-1 ED.2. V některých případech je možné chyby z měřicího řetězce úplně odstranit.

6.1 Vliv teploty srovnávacích konců na výsledek měření a její korekce

Výsledek měření závisí nejen na teplotě termoelektrického spoje, ale i na teplotě srovnávacích spojů, protože zjištění hodnoty termoelektrického napětí vychází z rozdílu obou teplot, přičemž jedna z nich musí být známa a pro přesná měření udržována na konstantní hodnotě. K dosažení správných výsledků je nutné dodržet teplotu srovnávacích spojů, pro kterou je měřicí přístroj cejchován. Tato vlastnost má dopad na konstrukci měřicího řetězce, neboť sálání tepla měřeného média může ohřívat referenční teplotu srovnávacích spojů. V praxi je tedy zapotřebí se tomuto aspektu vyhnout například prodloužením termočlánku a vhodným umístěním srovnávacích spojů. Pokud i přes veškerá snažení nelze dodržet tuto teplotu na konstantní hodnotě, musí se brát ohled tento na rozdíl teplot a opravit výslednou změřenou hodnotu. Pro hrubé opravy některých typů termočlánků (Cu-Ko, Fe-Ko, NiCr-Ni) stačí přičíst 1°C pro každý stupeň Celsia, o který se zvýší teplota srovnávacích spojů.

Tab. 5 Korekční tabulka [11]

Měřená teplota [°C]	Cu	Fe	NiCr	Ni+NiCr	Cr+Al	Pt+PtRh
100	0,85	1		1	1	
200	0,75	0,9	0,8	1	1	
300	0,65	0,9	0,75	1,1	1	0,65
400	0,65	0,9	0,75	1,1	1,1	0,65
500		0,9	0,75	1,2	1	0,6
600		0,9	0,75	1,1	1	0,6
700		0,8	0,75	1,1	1	0,55
800		0,8	0,75	1,1	1	0,55
900		0,8	0,75	1,1	1,1	0,5
1000				1,1	1,1	0,5
1100				1,1	1,1	0,5
1200					1	0,5
1300						0,5
1400						0,5
1500						0,5

Pro přesnější měření je vhodné provádět opravy podle faktoru z korekční tabulky. Mějme termočlánek Pt+PtRh, kterým měříme teplotu 800 °C. Měřicí přístroj je cejchován pro teplotu srovnávacích spojů např. 20 °C, avšak přídavný teploměr u těchto spojů ukazuje 30 °C, což je o 10 °C více. Tab. 5 udává pro termočlánek Pt+PtRh a měřenou teplotu 900 °C faktor 0,5. Výsledné teploty docílíme vynásobením tohoto faktoru s tepelným rozdílem skutečné hodnoty teploty srovnávacích spojů a cejchované hodnoty. Z toho vyplývá vztah (6)

$$T = T_M + \Delta T \cdot k_f \quad (6)[11]$$

kde

T = výsledná teplota [°C]

T_M = měřená teplota [°C]

ΔT = rozdíl teplot srovnávacích spojů [°C]

k_f = korekční faktor [-]

Dosadíme do vztahu (6)

$$T = 900 + 10 \cdot 0,55 = 905,5^\circ\text{C}$$

S korekcí je výsledná teplota o 5,5°C vyšší. V případě, že by byla teplota srovnávacích spojů nižší, je zapotřebí součin korekčního faktoru a rozdílu teplot od naměřené hodnoty odečíst. V některých aplikacích se bohužel nedá vyhnout kolísání teploty, tudíž ani není možné udržet teplotu srovnávacích spojů konstantní. V tomto případě je vhodné použít termostat, který udržuje srovnávací spoje na konstantní teplotě. V praxi jsou konce prodlužovacího vedení umístěny do skříňky, vytápěné na požadovanou teplotu za pomoci regulátoru. Nejpresnější a velice jednoduchý příklad termostatu, který se používal dříve v laboratorním prostředí, je thermosová láhev, která je naplněná tajícím ledem. Dnes se u číslicových měřicích systémů nejčastěji používá tzv. izotermická svorkovnice, jejíž teplota se snímá např. polovodičovým odporovým teploměrem a příslušná korekce se vyhodnotí softwarově.

6.2 Nevhodné kompenzační vedení

Výsledek měření může značně ovlivnit také nesprávné připojení kompenzačního vedení k termočládku. To znamená, že kompenzační vedení může být vyrobeno z levnějšího materiálu, než termočládkové vedení, avšak musí mít stejné vlastnosti, neboť nesmí vznikat nové termoelektrické síly. Pokud tomu tak není, může být chyba měření řádově několik jednotek stupňů Celsia. Pokud teplota místa srovnávacích spojů, kde bývá přivedeno kompenzační vedení pro daný typ termočládku, je výrazně vyšší, dochází ke vzniku termoelektrické síly v opačném směru. Výsledná teplota je tedy algebraický součet termoelektrických sil termočládků a kompenzačního vedení.

6.3 Ohmický odpor měřicího řetězce

Při použití analogových, magnetoelektrických měřicích přístrojů je vnitřní odpor v řádech kΩ, pak ohmický odpor řetězce hraje roli. V případě digitální techniky s vysokým vstupním odporem můžeme tuto chybu zanedbat.

Elektrický odpor v obvodu způsobuje chyby měření, protože vzniklé napětí na termočládku, které je dáno cejchovací tabulkou, platí právě tehdy, když obvodem neprochází žádný elektrický proud. Voltmetr by ukazoval správnou hodnotu napětí pouze v případě, kdyby celkový odpor měřicího řetězce od spoje termočládku, až po voltmetr, byl nulový.

Takového stavu pochopitelně nelze dosáhnout, tudíž tento odpor snižuje naměřenou hodnotu napětí. Pokud je odpor termočlánku a vedení poměrně malý proti odporu voltmetru, je chyba vyjádřena vzorcem (7)

$$U = U_a \cdot \left(1 + \frac{r}{R}\right) \quad (7)[11]$$

kde

U = skutečné napětí [mV]

U_a = naměřené napětí [mV]

r = celkový odpor měřicího řetězce (termočlánek, kompenzační a spojovací vedení) [Ω]

R = odpor voltmetru [Ω]

Problém nastává při výpočtu odporu termočlánku. Elektrický odpor se mění s teplotou. Zde záleží na konstrukci a tepelné vodivosti termočlánků, neboť se nezahřívá pouze měřící spoj, ale i termočlánekové větve. Postupné vedení tepla může měnit elektrický odpor v čase. Musíme tedy odhadnout střední hodnotu teploty, což vytváří určitou nejistotu. Tento problém se řeší metodou přímého měření odporu a následným výpočtem podle vztahu (8)

$$R_c = \left(\frac{a_1}{a_2} - 1\right) \cdot \frac{R \cdot r_p}{R + r_p} \quad (8)[11]$$

kde

R_c = celkový odpor termočlánku a vedení [Ω]

R = odpor galvanometru [Ω]

r_p = paralelní odpor [Ω]

a_1 = odečtené napětí při odpojení r_p [mV]

a_2 = odečtené napětí při připojení r_p [mV]

6.4 Odvod tepla z měřících konců

Určení chyby měření způsobené odvodem tepla z pracovních konců je velice obtížné. Nejjednodušší způsob, jak chybu zjistit, je zkouška, avšak i toto řešení není zcela bez obtíží. Termočlánky jsou často vloženy do ochranných keramických nebo kovových trubic a také mívají keramickou izolaci. Výměna tepla mezi měřeným okolím a termočlánekem nebude spojitá. Výpočetní řešení bývá složité a zdoluhavé, proto je vhodné použít grafickou metodu. Zde je zapotřebí vědět přesný typ termočlánku.

6.5 Přejížděvé odpory

Přejížděvý odpor je všeobecný problém při spojování vodičů. Tuto chybu lze eliminovat, či zanedbat v případě, že spoje jsou čisté a jsou provedeny kvalitně. Prostředí umístění termočlánku zde také hraje svou roli – vlhkost, prašnost nebo kyselost prostředí. Je vhodné spoje chemicky ošetřit antikoročním přípravkem. Kvalita spojů tedy může značně ovlivnit výsledky měření a udržování čistých spojů bez oxidace je nezbytnou podmínkou pro správné výsledky měření.

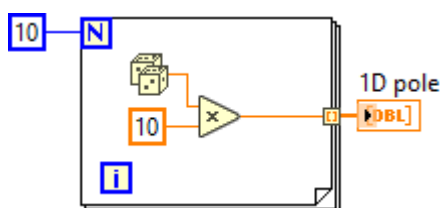
6.6 Chybné zabudování termočlánků a působení jímky

Termočlánky jsou velice dobře tepelně vodivé, což může způsobit odvod tepla z měřeného média. Z toho plyne, že při nesprávném zabudování termočlánku do místa měření, může dojít k jeho ochlazení. Termočlánekové vedení a jímky odvádějí teplo a tím se změní teplota měřicího spoje. Měříme-li nějaký objekt, je nutné použít vhodnou tloušťku termočlánekového vedení v poměru s velikostí měřeného objektu, neboť termočlánek nesmí příliš odvádět teplo (ochlazovat objekt).

Keramické jímky termočlánků způsobují tlumení měřených hodnot, které jsou při změnách teploty zpožděny. Toto zpoždění měřených hodnot snižuje citlivost termočlánku.

7 Úvod do LabVIEW

LabVIEW je programovací vývojové prostředí od National Instruments, dále jen NI, které nabízí tvoření kódu pomocí grafické interpretace kódu. Hlavní výhodou tedy je, že není zapotřebí znalost textového programovacího jazyka, avšak mnoho principů vychází z jazyka C. Jednoduché algoritmy lze tvořit velice rychle a přehledně. Obsahuje mnoho funkcí a knihoven pro analýzu naměřených dat. Síťová komunikace je možná přes TCP/IP. Pro externí hardware slouží měřicí karty od NI, přes které lze data



Obr. 7 Smyčka „for“ pro generování náhodných čísel

měřit nebo generovat jak v analogové nebo digitální podobě. LabVIEW obsahuje blokový diagram (tvoření kódu) a čelní panel, kde jsou grafické prvky výsledného programu. Na čelním panelu (GUI) lze provádět grafické úpravy, avšak designové prvky jsou v základu velice omezeny. Aplikace tvořené v LabVIEW se hodí především v průmyslu.

Kód na obr. 7 zobrazuje smyčku „FOR“ v blokovém diagramu, která generuje deset náhodných čísel v rozsahu 0:10 do 1D pole. Na čelním panelu se zobrazí pouze výsledek v podobě 1D pole. Na první pohled je zřejmé, že zde není textový kód a vytvoření tohoto algoritmu nám zabere několik desítek sekund.

7.1 National instruments hardware

National Instruments nabízí k softwarovému prostředí LabVIEW také vlastní hardware. Pro mou bakalářskou práci jsem použil měřicí kartu NI-USB-6008, dále CompactDAQ chassis USB-9162, do kterého je vložen modul NI-9211 pro měření teploty s pomocí termočlánků. Ke komunikaci s PC slouží tedy univerzální sériová sběrnice USB. Na obr. 8 jsou fotografie výše zmíněného hardwaru.



Obr. 8 National Instruments hardware

USB-9162 CompactDAQ chassis je levné a přenosné řešení pro moduly z řady NI C Series. Zajišťuje konektivitu přes USB s modulem NI-9211.

Modul NI-9211 umožňuje analogový sběr dat o teplotě a obsahuje anti-aliasingový filtr, detekci otevřeného termočlánku a kompenzaci studeného konce vedení. Je vybaven kalibrací NIST (National Institute of Standards and Technology).

Měřicí karta NI-USB-6008 je poměrně levné, multifunkční zařízení, které disponuje analogovými a digitálními vstupy a výstupy - 8 AI (12-Bit, 10 kS/s), 2 AO (150 Hz), 12 DIO. Slouží ke sběru nebo generování dat. LabVIEW nabízí konfigurační nástroj tzv. DAQ assistant, který provede uživatele jednotlivými kroky pro měření nebo generování dat. V případě potřeby lze DAQ assistant nahradit vlastním kódem.

8 Ochranný prvek watchdog timer

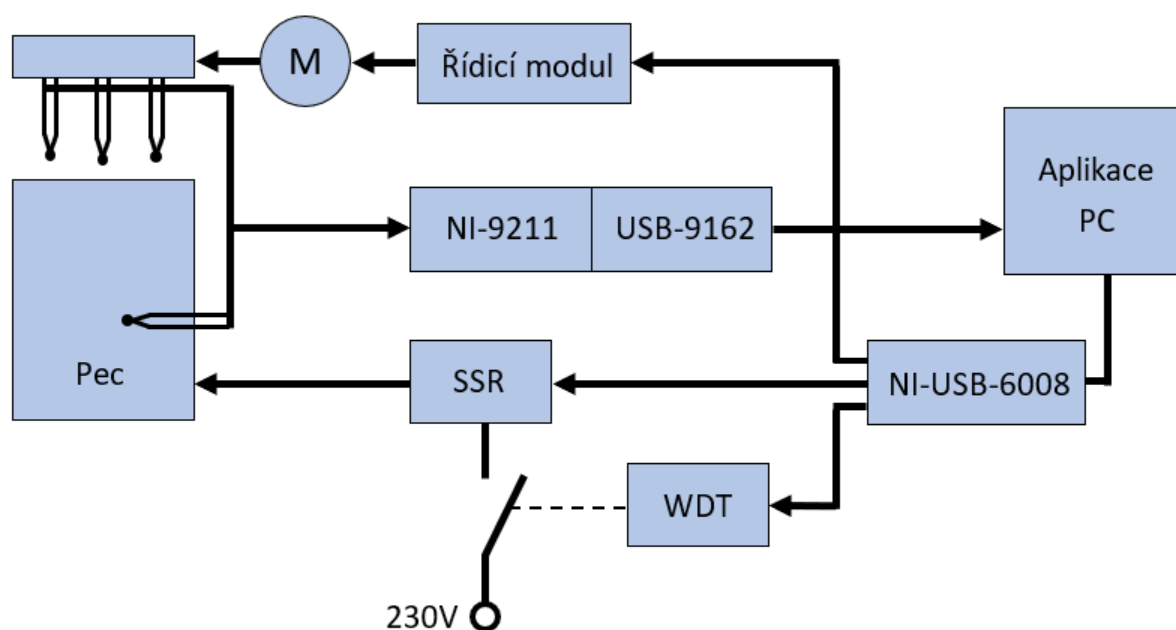
Určitá skupina systémů vyžaduje jistící mechanismy. V případě neočekávaného selhání systému přejímá tento mechanismus bezpečnostní funkci a zajistí při zamrznutí programu reset nebo uvedení soustavy do bezpečného stavu. Watchdog, watchdog timer nebo zkráceně WDT (z angličtiny „hlídací pes“) je periferie, která přebírá tuto funkci. Princip činnosti je velice jednoduchý. Systém nebo aplikace při správném chodu opakovaně posílá signál do watchdog timeru v podobě předem definovaných impulzů nebo pomocí speciální strojové instrukce a tím nuluje jeho interní čítač. Přestane-li watchdog přijímat informaci o chodu programu v daném časovém intervalu, provede reset chráněného zařízení. Účelem je tedy přivést systém zpět k normální funkci. Bez tohoto opatření se musí reset provést manuálně a to přispívá ke snížení bezpečnosti.

9 MySQL databáze

Databáze typu MySQL je relační databáze, což znamená, že je založena na tabulkách. Položky jsou ukládány na jednotlivé řádky a sloupce označují atributy položek. Sloupce mohou obsahovat pouze prvky stejného datového typu, chovají se tedy jako pole např. v jazyce C. Databáze však neslouží pouze jako uložisko dat. Jedná se o vyladěný a sofistikovaný nástroj, který za uživatele řeší mnoho problémů jako zabezpečení nebo optimalizace výkonu. V prostředí phpMyAdmin, které je nejvíce používané a rozšířené, lze také např. vykreslit graf z uložených hodnot, export dat apod.

10 Realizační část

V této kapitole se dostávám k samotné modernizaci měřicího pracoviště. Klíčovým a zároveň nejrozsáhlejším bodem je automatický posun termočlánku do pece. Zahrnuje několik konstrukčních technologií, elektrický návrh a softwarové řešení. Dále se věnuji řízení pece pomocí PWM regulace a aplikace ochranného prvku WDT, který běží na platformě Arduino Nano. V obslužné aplikaci implementuji algoritmus pro detekci ustálení teplot a ukládání dat v podobě MySQL databáze. Na obr. 9 je znázorněno blokové schéma měřicí úlohy. Jednotlivým blokům se věnuji v další části práce. obr. 9 blokové schéma modernizované měřicí úlohy



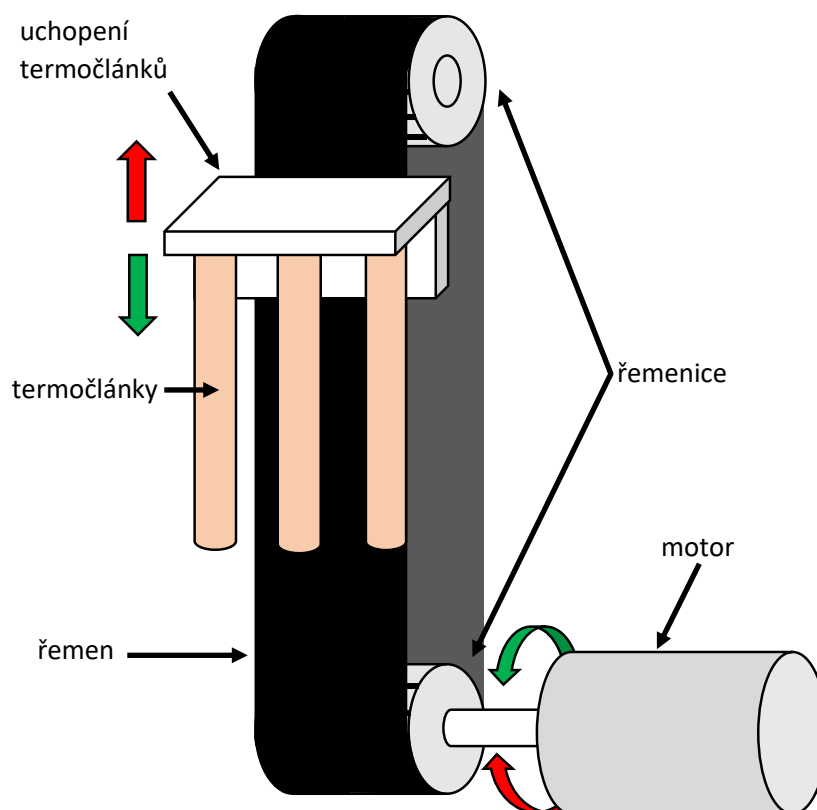
Obr. 9 Blokové schéma modernizované měřicí úlohy

11 Návrh řešení automatického posunu termočlánků do pece

Před modernizací úlohy byly termočlánky upevněny na lineárním, vertikálně orientovaném manipulátoru bez přidaného pohonu, viz obr. 1. Manipulace s termočlánky musela být prováděna ručně. V horní poloze byly termočlánky zabrzděny proti pohybu dolů pouze západkou v podobě drátu. V dolní poloze byly termočlánky zabrzděny koncovou polohou lineárního vedení a konce termočlánků doléhaly na dno pece. Návrhy řešení popisují níže.

11.1 Návrh řešení 1

První návrh řešení na obr. 10 je založen na pohonu krokového nebo stejnosměrného komutátorového motoru s převodovkou. Na hřídeli motoru je umístěna řemenice, která umožní pohyb ozubeného řemene. Na tomto řemenu jsou upevněny termočlánky. Řemen je napnutý druhou řemenicí, která je připevněna na hřídeli na druhém konci. Tato hřídel je vsunuta z obou stran mezi dva ložiska v domečcích. Horní a dolní poloha termočlánků je ošetřena pomocí mechanických koncových spínačů. Takové řešení vyžaduje mnoho konstrukčních úprav stávajícího pracoviště a také vysoký výkon motoru, poněvadž termočlánky spolu s úchytem na manipulátor váží cca 1,1 kg, tudíž je tento návrh řešení v práci pouze teoreticky naznačen a věnoval jsem se jinému, dále popsanému návrhu.



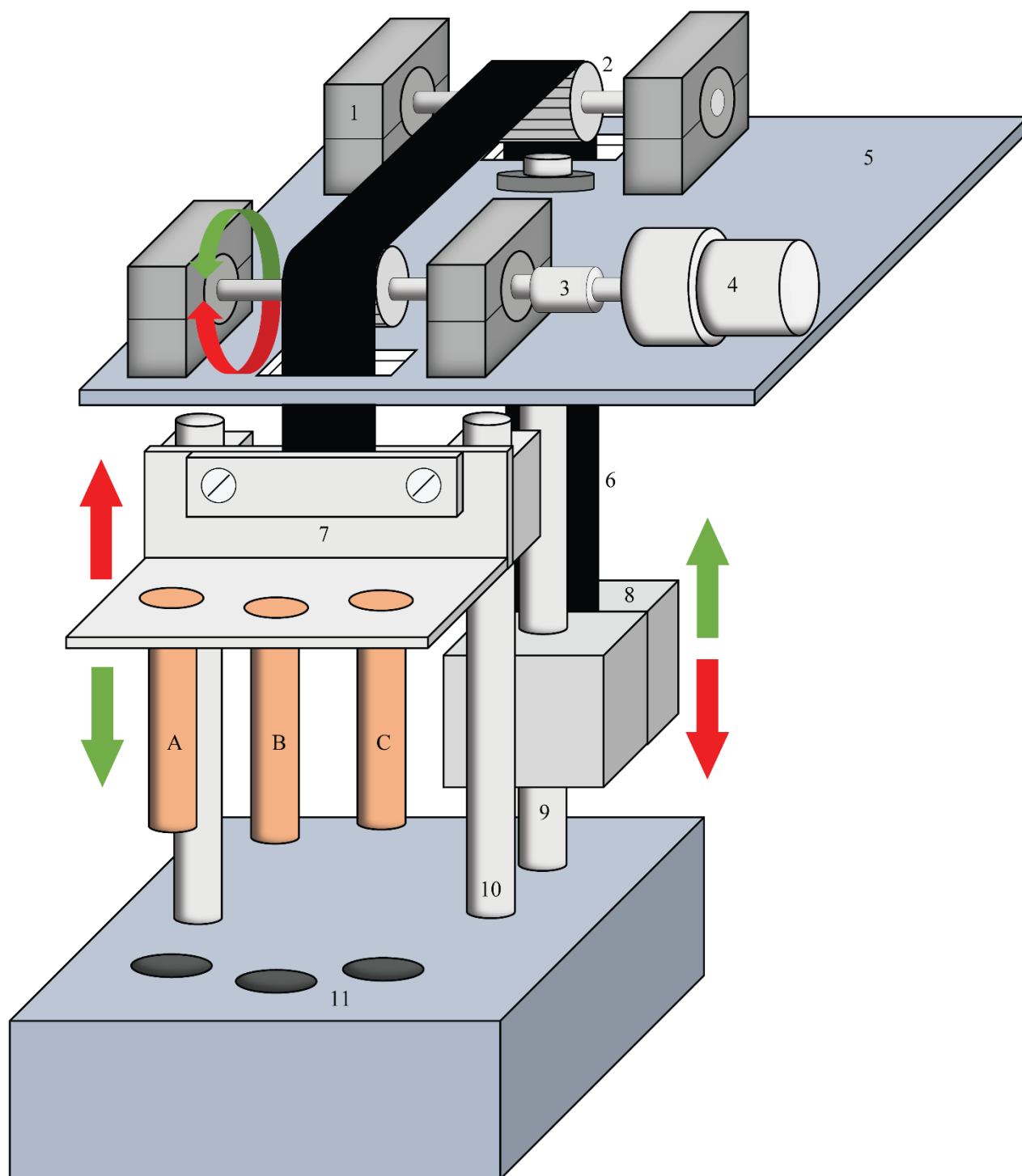
Obr. 10 Návrh řešení 1

11.2 Návrh řešení 2

Druhý návrh řešení je velice podobný. Hlavní rozdíl je v požadovaném výkonu motoru, který je zlomkem výkonu, než v případě prvního řešení. Rozdíl spočívá v protizávaží k váze termočlánků. Motor tedy pro rozpohybování soustavy potřebuje pouze překonat třecí sílu v ložiscích, viz obr. 11. V původním řešení měl být použit krokový motor, ten však má komplikovanější řízení obtížně řešitelné s použitou DAQ kartou, se kterou nejsme schopni docílit tak rychlých změn, aby se motor otáčel dostatečně rychle. Problém řeší stejnosměrný komutátorový motor s čelní převodovkou v příslušném poměru. Změna směru otáčení motoru je prováděna reverzací.

Popis konceptu řešení Obr. 10 Návrh řešení 1

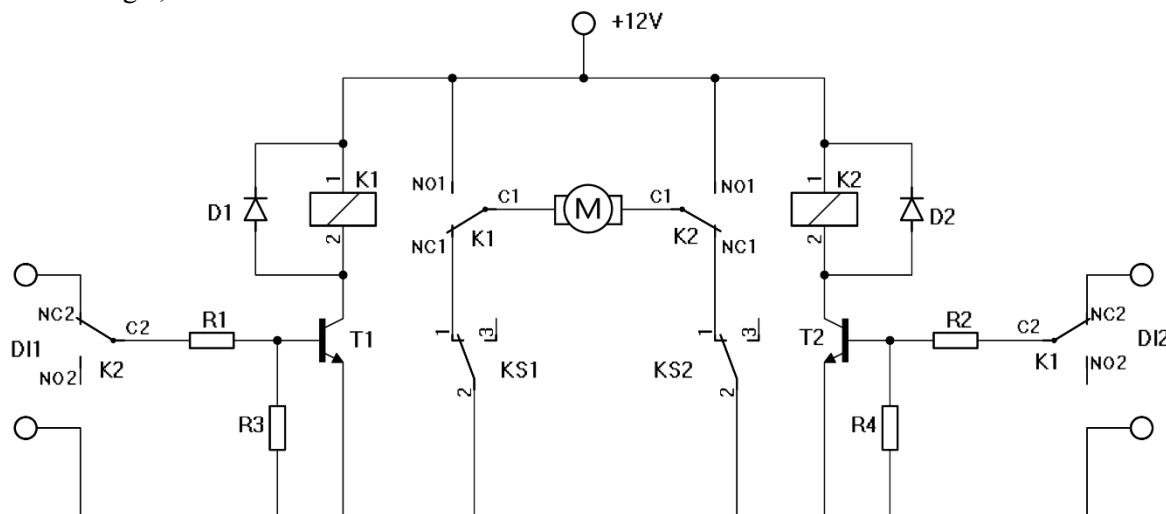
- 1) Domeček pro ložisko
- 2) Řemenice
- 3) Spojka
- 4) Motor
- 5) Kovová základna pro uchopení komponentů
- 6) Řemen
- 7) Uchycení a termočlánky (A, B, C)
- 8) Protizávaží
- 9) Vodící tyč pro protizávaží
- 10) Vodící tyč pro lineární manipulátor termočlánků
- 11) Pec



Obr. 11 Koncept řešení

11.3 Návrh řízení motoru

Automatický posun termočlánků do pece je řízen pomocí stejnosměrného komutátorového motoru s převodovkou, který je ovládán z obslužné aplikace stolního počítače. Motor zajistí pohyb řemene do obou směrů, což vyžaduje změnu směru otáček. Vytvořil jsem elektrické schéma řídicího modulu v softwaru Eagle, viz obr. 12.



Obr. 12 Elektrické schéma řídicího modulu

Digitální vstupy DI1 a DI2 z měřicí karty NI USB-6008 skrze obslužnou aplikaci ovládají tranzistor v zapojení spínače a řídicí modul umožňuje ovládat směr otáčení. Ve vypnutém stavu DI1 a DI2 jsou kontakty obou relé K1 a K2 v poloze NC (Normally closed) – motor není připojen k napětí. Druhý pár kontaktů obou relé je spojen s digitálními vstupy. Přivede-li se napětí na DI1, začne téct proud přes rezistor R1 do báze tranzistoru T1, který zajistí průchod proudu cívkou relé K1. Kontakt C1 přeskočí do NO1, čímž přivede na motor napájecí napětí 12V. Druhý kontakt relé K1, který je zapojen jako blokace, tedy rozeptne obvod před tranzistorem T2 a pomocí DI2 v tento okamžik nelze motor ovládat. Toto opatření slouží k ochraně proti zkratu. Pokud by oba vstupy DI1 a DI2 byly aktivní, došlo by ke zmíněnému zkratu a potenciálnímu zničení tranzistorů. Tato blokáce funguje i pro DI1, pokud je aktivní relé K2. Diody D1 a D2 slouží jako ochrana tranzistorů před napěťovou špičkou při jejich rozeptnutí. Relé přitahuje kontakty pomocí cívky, která má charakter indukčnosti. Při rozeptnutí kontaktů tato cívka generuje napěťovou špičku, která by mohla poškodit tranzistor. Dioda zajistí uzavření obvodu kolem indukčnosti a k poškození tranzistoru nedojde. Koncové spínače KS1 a KS2 slouží k rozeptnutí obvodu, když termočlánky dojedou do koncové polohy.

Pro sepnutí kontaktů musí cívkou relé téct elektrický proud 35 mA při nominálním napětí 12 V. Aby tranzistor dokázal sepnout proud 35 mA, musí protékající bázevý proud I_B mít nejmenší hodnotu, jako kolektorový proud I_C podělený zesilovacím činitelem tranzistoru (DC Current Gain - h_{FE}). Tranzistor BC337-25 má pro kolektorový proud $I_C = 100$ mA hodnotu $h_{FE}=160$.

Podle vzorce (9) jsem spočetl bázevý proud

$$I_B = \frac{I}{h_{FE}} \quad (9)[8]$$

kde

I = proud, který bude spínat tranzistor

h_{FE} = zesilovací činitel tranzistoru pro různý kolektorový proud I_C

Dosadil jsem proud relé $I = 35\text{mA}$ a z datasheetu $h_{FE} = 160$ pro $I_C = 100\text{ mA}$

$$I_B = \frac{I}{h_{FE}} = \frac{35}{160} = 0,22\text{ mA}$$

Nyní znám minimální bázový proud, který se však v praxi dimenzuje 3 až 5 násobek spočteného proudu, tedy

$$I = I_B * 5 = 0,22 * 5 = 1,1\text{ mA}$$

S jistotou tedy vím, že tranzistor sepne proud kolektorem $I_C = 35\text{mA}$ při bázovém proudu $I_B \approx 1\text{mA}$. Abych docílil takového proudu, musím nadimenzovat příslušný odpor před bází tranzistoru. Měřicí karta NI USB 6008 poskytuje digitální výstup s hodnotou 5 V. Napětí mezi bází a emitorem bude v sepnutém stavu přibližně 0,7 V. Pro výpočet odporu před bází tedy zbývá 4,3 V. Z Ohmova zákona (10) jsem zjistil hodnotu předřadného odporu

$$R = \frac{U}{I} \quad (10)[8]$$

kde

R = odpor [Ω]

U = napětí [V]

I = proud [I]

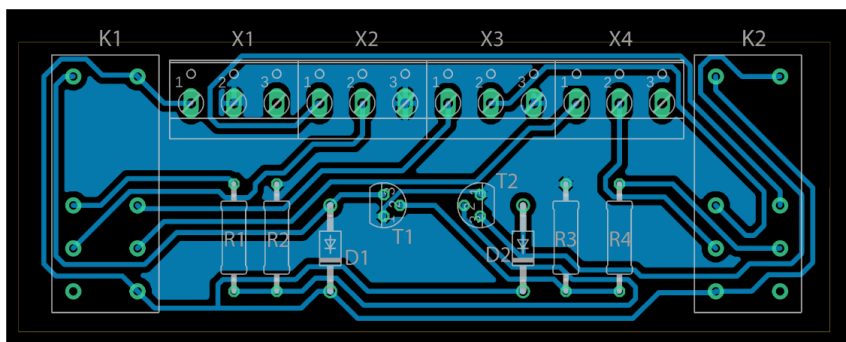
dosadil jsem

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,3}{0,001} = 4,3\text{ k}\Omega$$

Ke spočtené hodnotě předřadného odporu musím zvolit vhodnou řadu odporů. Nejbližší hodnota se nabízí 4,7k Ω . Vybraný odpor z řady je sice vyšší, ale vím, že jsem bázový proud předimenzoval 5 násobkem spočteného proudu, tudíž mírně vyšší hodnota předřadného odporu není na závadu.

11.5 Deska plošného spoje pro řídicí modul

První fáze návrhu desky plošného spoje je elektrické schéma, na které navazuje osazovací schéma, viz obr. 13. Pro tuto práci jsem použil opět program Autodesk Eagle. Obsahuje mnoho knihoven pro základní i složitější elektronické součástky včetně reálných rozměrů jejich pouzder. U některých komponentů je možný také 3D náhled. Při tvoření schématu jsem v dostupných knihovnách nenašel požadované relé. V takovém případě je zapotřebí si součástku navrhnout.



Obr. 13 Osazovací schéma řídicího modulu

Popis svorkovnice

X1:

- 1) $V_{CC} +12\text{ V}$ napájecí napětí
- 2) GND
- 3) -

X2:

- 1) DI1
- 2) DI2
- 3) Koncový spínač 1 (první kontakt)

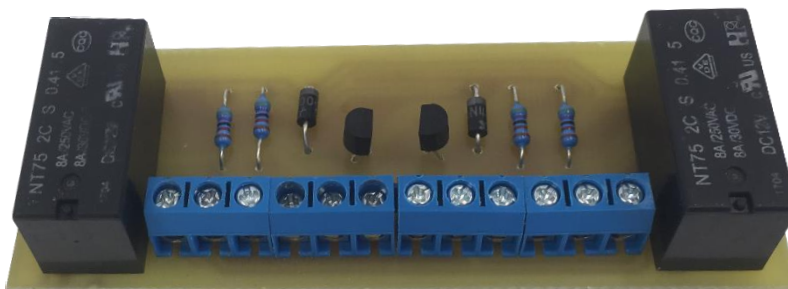
X3:

- 1) Koncový spínač 1 (druhý kontakt)
- 2) Koncový spínač 2 (první kontakt)
- 3) Koncový spínač 2 (druhý kontakt)

X4:

- 1) M1 (motor, pól 1)
- 2) M2 (motor, pól 2)
- 3) -

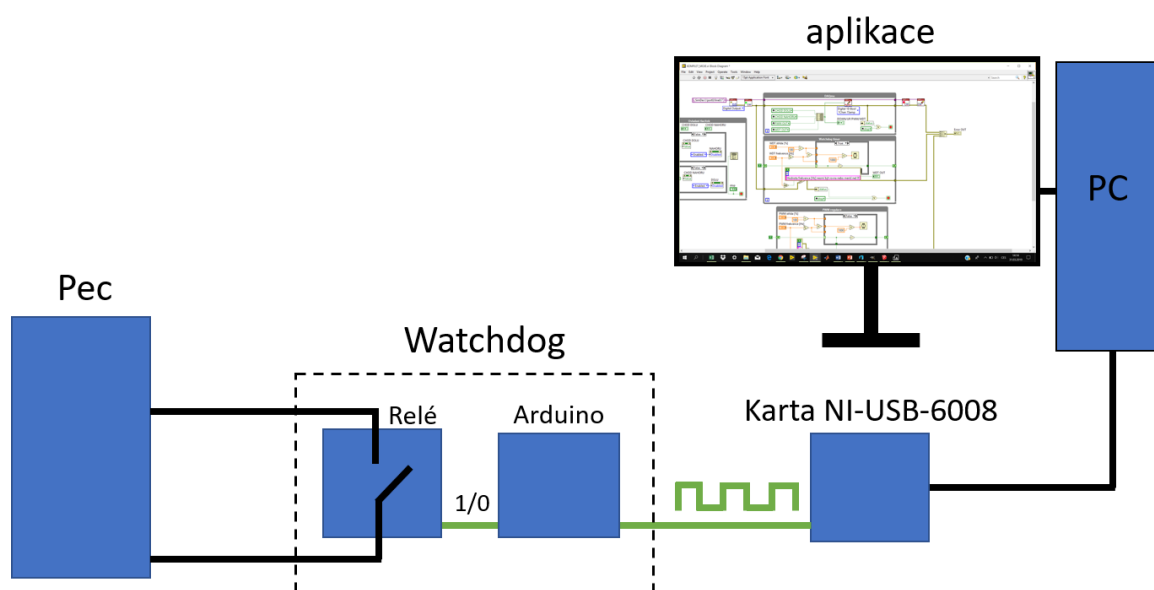
Vstup pro napájecí napětí V_{CC} slouží k napájení celého řídicího modulu. Relé i motor jsou dimenzovány pouze na 12 V. Na digitální vstupy DI1 a DI2 jsou připojeny výstupy z měřicí karty NI-USB-6008. Přes dvoupólové zapojení koncových spínačů jsou připojeny kontakty, které jsou v neaktivním stavu sepnuty. Dvojice výstupu M1 a M2 slouží k napájení motoru. Lze si povšimnout, že svorky koncových spínačů X2-3 a X3-3 jsou zároveň GND. Na obr. 14 můžete vidět fotografii tohoto modulu.



Obr. 14 Řídicí modul

12 Ochrana pece před přehřátím

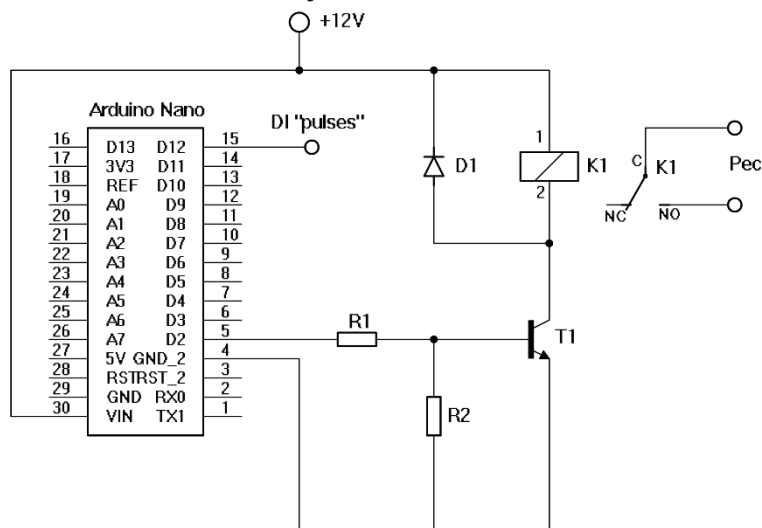
V peci je permanentně připojen termočlánek, který slouží k regulaci teploty v peci. V obslužné aplikaci lze nastavit požadovanou teplotu, standardně 200 °C a pomocí PID regulátoru a PWM řízení je pec vytápěna na právě zvolenou teplotu. Pokud nastane softwarová chyba díky operačnímu systému Windows nebo zamrzne obslužná aplikace, může dojít k neřízenému vytápění pece. Proto je nutné přidat ochranný prvek a to externí WDT, který umožňuje hlídat správný chod aplikace v podobě přijímání digitálních pulsů. Do obslužné aplikace jsem implementoval algoritmus, který generuje pulsy s frekvencí 1 Hz a střidou 50 % a přes měřicí kartu NI-USB-6008 jsou tyto pulsy posílány do externího WDT. Pokud aplikace selže a příslušný výstup měřicí karty přestane generovat pulsy, WDT tento stav zaznamená jako chybu. Ochrana funguje také v případě, že aplikace běží správně, ale měřená teplota v peci přesáhne dovolené maximum. Na obr. 15 je blokově znázorněna ochrana pece.



Obr. 15 Blokové schéma ochrany pece

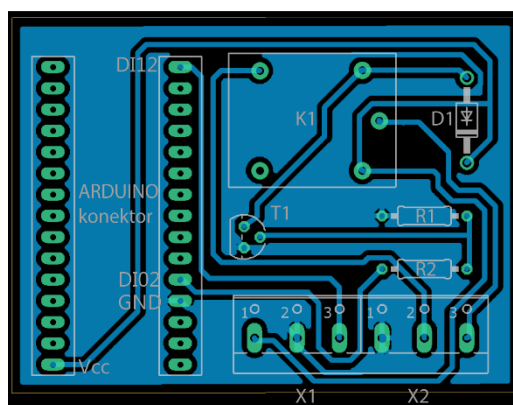
12.1 Deska plošného spoje pro watchdog timer

Elektrický návrh a návrh desky plošného spoje jsem opět vytvořil v programu Autodesk Eagle. Pro ovládání relé je využito zapojení tranzistoru jako spínače. Výpočet hodnoty odporů jsem uvedl v kapitole 11.3 Návrh řízení motoru. O zaznamenání a vyhodnocení poruchy obslužné aplikace se stará platforma Arduino Nano. Elektrické schéma je znázorněno na obr. 17.



Obr. 16 Elektrické schéma externího watchdog timeru

Osazovací schéma externího WDT je znázorněno na obr. 17.



Obr. 17 Osazovací schéma externího watchdog timeru

Popis svorkovnice

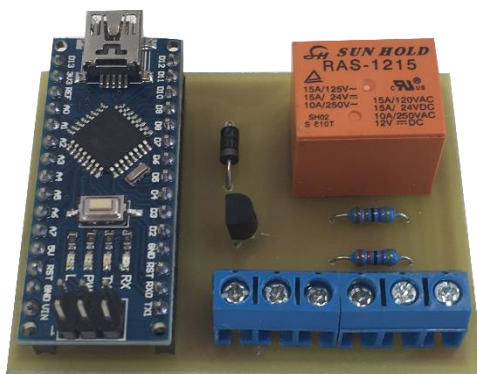
X1

- 1) $V_{CC} +12V$ napájecí napětí
- 2) GND
- 3) DI „pulses“

X2

- 1) GND
- 2) Akční člen (pól 1)
- 3) Akční člen (pól 2)

Vstup V_{CC} slouží k napájení celého watchdog timeru. Digitální vstup DI „pulses“ slouží k přijímání impulsů do Arduina. Svorky X2-2 a X2-3 slouží k rozpojení obvodu akčního členu – v tomto případě se jedná o pec. Na obr. 18 je fotografie tohoto externího WDT.

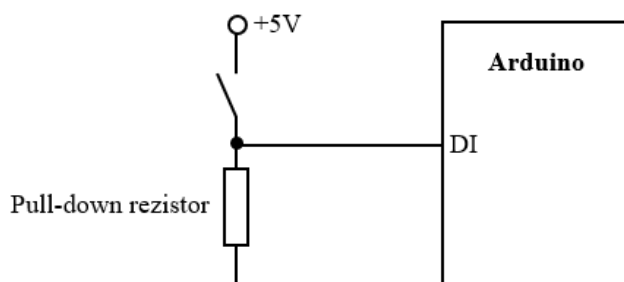


Obr. 18 Externí watchdog timer

12.2 Arduino Nano program

Princip činnosti programu pro zaznamenání chyby je následující. Na digitální vstup Arduina jsou generovány pulsy z obslužné aplikace měřící úlohy přes měřící kartu NI-USB-6008. Tyto pulsy signalizují správný chod aplikace a digitální výstup, na kterém je připojen tranzistor jako spínač, je v logické hodnotě 1 – tedy tranzistor je otevřen a relé, na kterém je připojeno napájení pece, je sepnuto. V každém oběhu smyčky algoritmus každých 500ms kontroluje, zda-li přichází náběžná nebo sestupná hrana, což je ošetřeno logickou funkcí XOR, kdy je porovnáván aktuální a minulý stav digitálního vstupu. Pokud jsou tyto stavy shodné, znamená to, že digitální vstup přijímá pouze logickou hodnotu 0 nebo 1. Shoda hodnot ještě nemusí signalizovat poruchu, ale v tomto čase nastává odpočet do vypnutí relé. V mé aplikaci se relé rozepne, pokud na digitálním vstupu nezaznamenáme změnu po dobu 20 sekund. Takto je vyřešena ochrana pece před přehřátím při pádu aplikace. V obslužné aplikaci jsem také ošetřil vypnutí generování pulsů do WDT při překročení maximální dovolené teploty v peci.

Co je **pull-down rezistor** a proč ho zmiňuji. Digitální vstup Arduina zaznamená logickou hodnotu 0 tehdy, kdy je na jeho vstupu napětí 0 - 0,8V. Logickou hodnotu 1 zaznamená tehdy, kdy je na jeho vstupu napětí 2 - 5V. Tzv. zakázaná oblast napětí v intervalu 0,8 - 2V je stav, kdy Arduino není schopno vyhodnotit logickou hodnotu a na tuto oblast napětí reaguje zcela náhodně. Tento stav je nežádoucí. Při testování mého návrhu bez pull-down rezistoru docházelo k zaznamenání logické hodnoty 1 i tehdy, kdy jsem na digitální vstup připojil pouze vodič bez napětí. Aby tedy byla s jistotou zaručena logická hodnota 0, je nutné připojit pull-down rezistor podle zapojení na obr. 19.

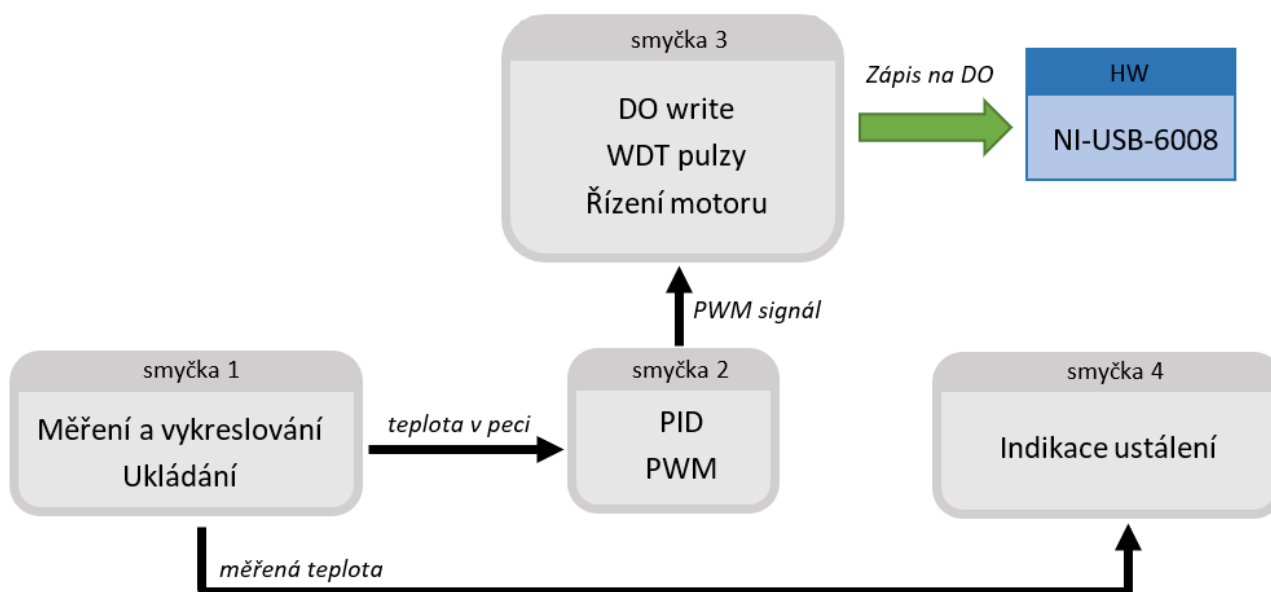


Obr. 19 Zapojení pull-down rezistoru

13 Obslužná aplikace

V softwarové části jsem se věnoval programování v LabVIEW. Na obr. 20 je znázorněna struktura obslužné aplikace. Program řeší tyto dílčí úlohy:

- měření a vykreslování dat do grafu
- řízení motoru (ovládání posunu termočlánků)
- detekci ustálení teplot
- PWM řízení pomocí PID regulátoru
- ukládání dat do MySQL databáze
- signalizace správného chodu programu v podobě generování pulsů pro externí WDT
- zápis požadovaných hodnot na digitální výstupy měřicí karty NI-USB-6008



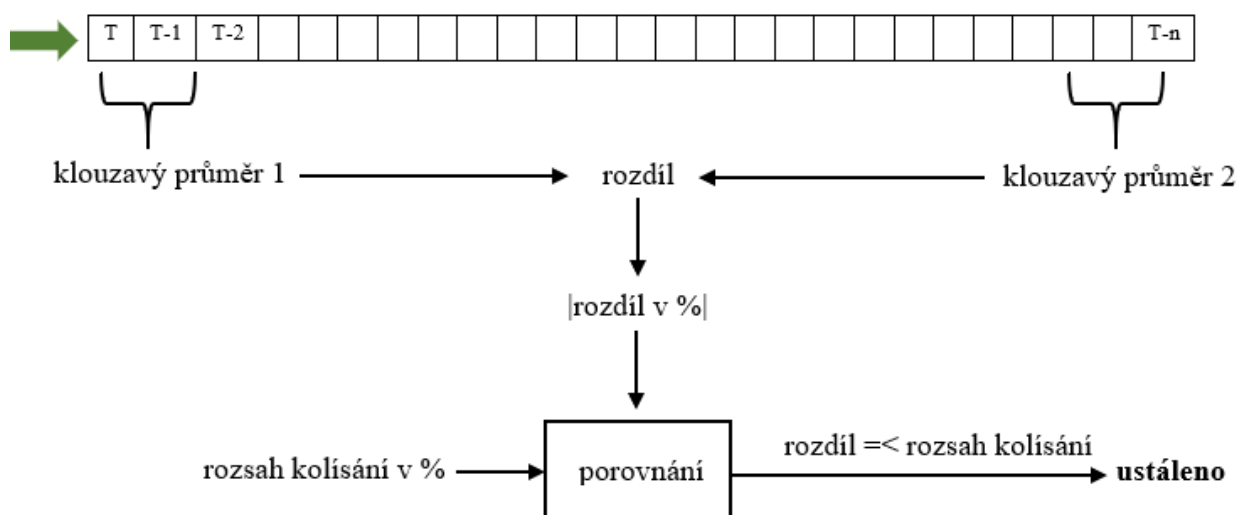
Obr. 20 Struktura obslužné aplikace

13.1 Řízení motoru pohonu termočlánků

Ovládání motoru se provádí pomocí tlačítek na čelním panelu obslužné aplikace. Princip algoritmu pro řízení motoru je ovládání dvou digitálních výstupů, každý pro různý směr otáčení motoru. Tyto digitální výstupy přivádějí logickou hodnotu 1, tedy 5V na příslušný vstup tranzistorového spínače na desce plošného spoje řídicího modulu, viz kapitolu 11.3. Uživatelské prostředí obsahuje dva tlačítka, označené směrem pohybu. K indikaci o chodu motoru, tedy informace o stavu logické hodnoty na digitálním výstupu, slouží blikající prvek v podobě LED diody. Aby nedošlo k situaci, že uživatel spustí oba směry najednou, slouží funkce „property node“. Tuto funkci si lze představit jako vlastnost proměnné, v našem případě tlačítka „nahoru“ a „dolů“. Klikne-li uživatel na jedno z tlačítek, druhé tlačítko se dostane do stavu „disabled“, což znamená, že není funkční a uživatel nemůže kliknutím změnit jeho hodnotu. Tlačítko se do stavu „enabled“ (opak disabled) dostane až tehdy, kdy přestane být aktivní první zmáčknuté tlačítko, jinak řečeno, než přestane být aktivní příslušný digitální výstup. Touto funkcí se oba tlačítka navzájem blokují a zastupují hardwarové řešení blokačních relé. Toto opatření jsem ještě pojistil právě zmiňovanými relé. Na řídicím modulu je to navrženo tak, že aktivní relé blokuje vstup tranzistorového spínače opačného směru. Hlavním důvodem těchto opatření je ochrana proti zkratu.

13.2 Detekce ustálení měřených teplot

Oteplovací křivka této úlohy trvá přibližně 30 minut. Graf v obslužné aplikaci zobrazuje hodnoty teplot v reálném čase a uživatel je schopen z vizuálního úsudku vyhodnotit ustálení teplot. Tento způsob je však nepřesný. Proto jsem naprogramoval algoritmus, který ustálení dokáže vyhodnotit a uživatel se tímto nemusí zabývat. Pokud bychom hovořili o ideálním měření, tak by byla ustálená teplota v každém časové okamžiku stejná a algoritmus by byl schopen vyhodnotit ustálení pouze na základě následující a předchozí hodnoty. Reálné výsledky z měření ukazují, že ustálená teplota se mění v určitém rozsahu v závislosti na řízení teploty v peci, kdy není reálné docílit konstantní hodnoty. Dalším problémem je velice pomalý děj ustalování, což znamená, že při cca 98% ustálené hodnoty se teplota může jevit jako ustálená, avšak ještě v jisté míře roste. Všechny tyto aspekty jsem při tvorbě algoritmu zhodnotil. Princip činnosti algoritmu je nastíněn na obr. 21. Spočívá v porovnávání klouzavého průměru posledních tří hodnot s klouzavým průměrem tří hodnot, který je o 20 vteřin zpožděn. Tento časový rozdíl je zde právě

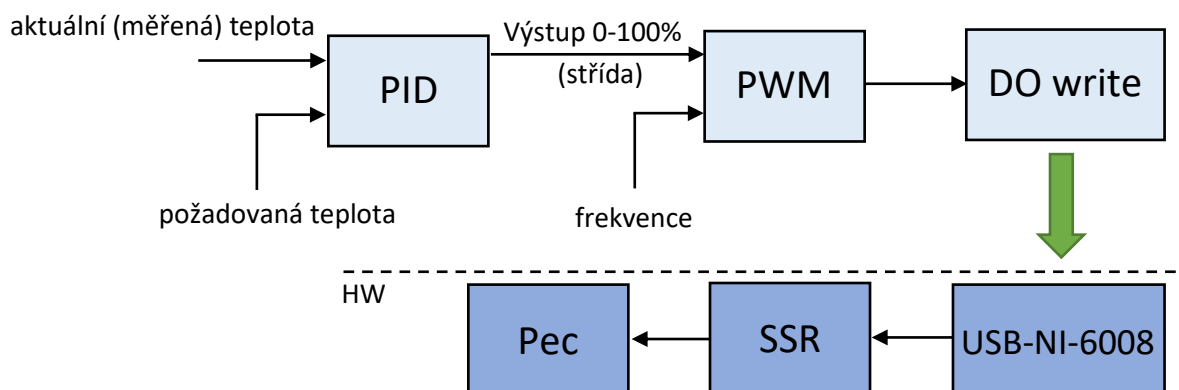


Obr. 21 Princip činnosti algoritmu pro indikaci ustálených teplot

z důvodu pomalého ustalování téměř před dosažení maximální hodnoty, který jsem popsal výše. Klouzavé průměry se od sebe odečtou a převedou se na absolutní hodnotu v procentuálním tvaru. Tuto hodnotu následně algoritmus porovnává s rozsahem kolísání. Rozsah kolísání je klíčový parametr při vyhodnocení ustálení teplot. Z experimentálního měření jsem zjistil, že ustálená hodnota kolísá v rozsahu cca 0,2%, což znamená, že pomocí tohoto parametru je uživatel schopen algoritmu zadat meze pro vyhodnocení ustálení. Pokud je tedy procentuální rozdíl klouzavých průměrů menší nebo roven rozsahu kolísání, je teplota ustálena.

13.3 PWM řízení

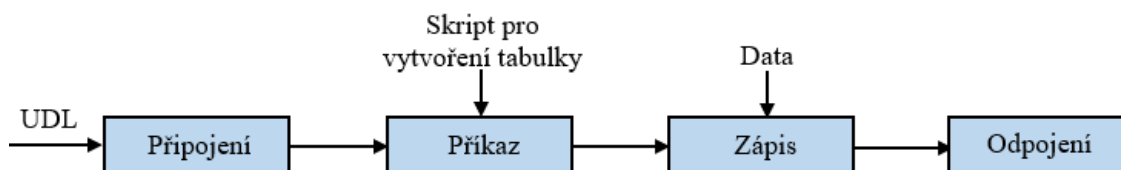
Teplotu v peci je zapotřebí řídit a udržovat na konstantní teplotě. K regulaci slouží PID regulátor, jehož zpětnou vazbou je teplota čtvrtého termočlánu, který je umístěn permanentně v peci. Výstup regulátoru je v rozsahu 0-100 %, přičemž tato hodnota udává střidu PWM signálu, který ovládá topné těleso. PWM řízení je tedy závislé na PID regulátoru, kterému uživatel zadá požadovanou teplotu. Algoritmus řízení má nastavitelnou frekvenci v případě potřeby, standardně je 1 Hz. Pomocí smyčky DO write se na digitálním výstupu měřicí karty NI-USB-6008 střídají logické hodnoty 1 a 0 v závislosti na střídě definované výstupem PID regulátoru a zadané frekvenci. Těmito pulsy je ovládáno SSR relé, které ovládá napájení pece. Na obr. 22 je znázorněno blokové schéma PWM řízení pece.



Obr. 22 Blokové schéma PWM řízení pece

13.4 Ukládání dat do databáze

Při vytváření algoritmu pro ukládání dat jsem zvolil MySQL databázi. Výsledná tabulka obsahuje sloupec datum a čas a tři sloupce pro naměřené hodnoty teplot. V LabVIEW existuje knihovna funkcí pro práci s databázemi, bohužel jsem v ní objevil softwarovou chybu, o které se zmíním dále. V prvním kroku je nutné spojení obslužné aplikace s databází. K tomu slouží funkce „DB Tools Open Connection“. Způsob připojení jsem zvolil pomocí UDL souboru, což je textový soubor, obsahující konfiguraci pro danou databázi s ODBC serverem, který je nutné nastavit v operačním systému Windows. **Důležité je, aby ODBC driver, který umožní spojení, měl stejnou bitovou architekturu jako aplikace, nikoliv jako operační systém.** Dalším krokem je vytvoření tabulky, kde lze využít knihovni funkce „DB Tools Create Table“. Programátor této funkce zadá parametry tabulky pomocí konstant. Problém nastal, když jsem potřeboval vytvořit sloupec datového typu Date/time. Samotná funkce nabízí zvolení tohoto datového typu, ale v databázi se vytvořil sloupec datového typu pouze Date. Tento problém jsem vyřešil pomocí funkce „DB Tools Execute Query“, která nabízí programátorovi vytvořit jakýkoliv příkaz v databázi pomocí skriptu.



Obr. 23 Blokové schéma ukládání dat do databáze

Tento skript se do funkce zadává pomocí konstanty datového typu string. Název tabulky zadá uživatel na čelnímu panelu aby byla v databázi lehce dohledatelná a identifikovatelná. Nyní je v databázi vytvořena tabulka a následuje zápis dat pomocí funkce „DB Tools Insert data“. V každé iteraci smyčky jsou data zapsány do tabulky a uživatel je může sledovat přímo v databázi. Po ukončení aplikace se zavře spojení s databází pomocí funkce „DB Tools Close Connection“. Na obr. 23 je znázorněno blokové schéma algoritmu.

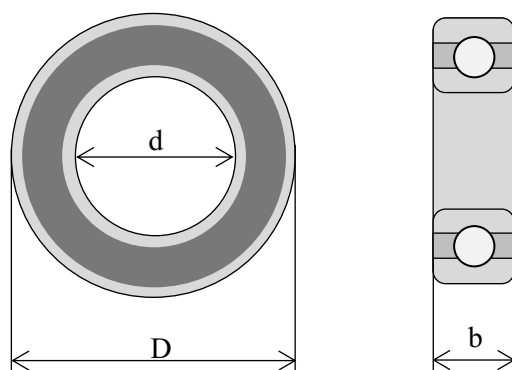
14 Konstrukce

Při sestavování konstrukce bylo zapotřebí nakoupit mnoho strojních a elektronických komponentů, popsanych v této kapitole. Některé části jsou specifické pro můj návrh řešení, proto jsem si několik komponentů navrhnul a nechal vyrobit. Výrobní proces těchto dílů probíhal na 3D tiskárně nebo manuální úpravou.

Ložiska 608 2RSR ZKL

Vnitřní průměr $d=8$ mm, Vnější průměr $=22$ mm, Šířka $b=7$ mm, hmotnost $m=0,015$ kg

V těchto kuličkových ložiscích jsou vsazeny hřídele, na kterých jsou umístěny řemenice. V návrhu řešení jsem využil celkem čtyři ložiska, která budou umístěna v plastových domečkách. Jeden pár ložisek slouží jako pohonná část, kde jeden konec hřídele je přes spojku spojen s hřídelí motoru. Druhý pár ložisek má funkci prodlužovací z důvodu konstrukčního řešení měřicího stanoviště. Na obr. 24 je znázorněn průřez ložiska s jeho rozměry.



Obr. 24 Průřez ložiska

Pružná spojka

Pro spojení hřídele motoru a poháněné hřídele slouží tato pružná spojka. Pružnost pomáhá vyrovnat nesouosost mezi jednotlivými hřídeli. Uchycení hřídelí je řešeno čtyřmi upevňovacími šrouby, tzv. červíky, viz obr. 25. Průměry děr jsou 8 mm a 5 mm.



Obr. 25 Pružná spojka

Vodící tyč typu W

S průměrem 8 mm

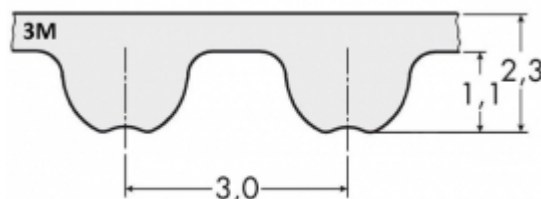
Vodící tyč typu W na obr. 26 je broušená a indukčně kalená. Slouží k lineárnímu pohybu závaží. Současně je použita jako hřídele mezi ložisky.



Obr. 26 Vodící tyč

Řemen ozubený HTD 3M 804 - 15 mm Optibelt OMEGA

HTD je typ řemenu, 3M je rozteč zubů (3 mm), což je důležitý údaj pro výběr řemenice, dále 804 označuje délku řemene v mm (počet zubů je 268), 15 mm je šířka řemene a Optibelt OMEGA je označení výrobce



Obr. 27 Profil ozubeného řemenu HTD 3M

Řemen spojuje uchopení termočlánku na lineárním manipulátoru a protizávaží, které je upevněno na uzavřeném linearsetu v podobě kuličkového ložiska v domečku. Tento linearset je umístěn na vertikálně orientované vodící tyči. Detail profilu řemene je znázorněn na obr. 27.

SMA Uzavřený linearset | typ kuličkového pouzdra v domečku

Pro hřídel s průměrem 8 mm

Uzavřený linearset na obr. 28 umožní plynulý pohyb protizávaží po vodící tyči. Tento díl také slouží k uchycení řemene, který se vloží mezi protikus a protizávaží.



Obr. 28 Uzavřený linearset

Řemenice HTD 3M 16T 16 mm/8 mm

HTD je typ řemenu, pro který je řemenice, 3M je rozteč zubů (3 mm), 16T je počet zubů, T (z angličtiny jako teeth), 16 mm je šířka řemenice, 8 mm je průměr otvoru pro hřídel.



Obr. 29 Řemenice HTD s upevňovacím šroubem

Zde chci podotknout, že řemenice tohoto **typu a rozměru s upevňovacím šroubem**, který je viditelný na obr. 29, jsem nemohl na českém trhu najít, ani přes dotazy na firmy a výrobce, kteří se těmito výrobky zabývají. Tyto řemenice se používají především v CNC a laserových strojích nebo v 3D tiskárnách.

DC motor série SGC270 s čelní převodovkou

Tento typ motoru je použit jako pohon pro posun termočlánků, viz obr. 30.

Vlastnosti motoru

Napětí: 12 V

Převodový poměr: 21:1

Jmenovitý moment: 171 g/cm

Jmenovité otáčky: 176 ot/min

Vlastnosti převodovky

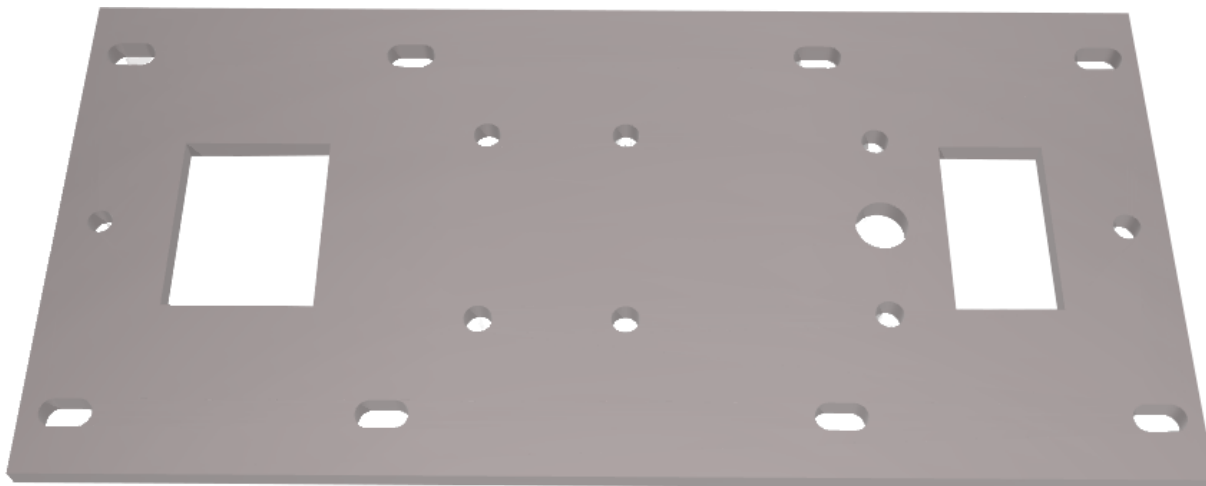
- Vůle naprázdno $\leq 2^\circ$
- Radiální zatížení $\leq 0,3$ kg
- Axiální zatížení $\leq 0,2$ kg
- Síla při lisování na hřídel ≤ 2 kg
- Radiální vůle $\leq 0,05$ mm
- Osová vůle $\leq 0,3$ mm



Obr. 30 DC motor série SGC270 s čelní převodovkou

Základna

Hliníková základna pro uchycení komponentů pro posun termočlánků. Rozměry jsou 85x180 mm. Na obr. 31 je zobrazen 3D model, který jsem vytvořil v programu SketchUp. Výroba vyžadovala manuální zhotovení všech otvorů.



Obr. 31 Základna

14.1 3D tisk

Použitý materiál je tzv. ASA (akrylonitril-styren-akrylat) na 3D tiskárně typu Průša i3 MK3. Pro složitější díly jsem použil vývojový program Autodesk Inventor, pro jednodušší postačil program SketchUp.

Domečky pro ložiska

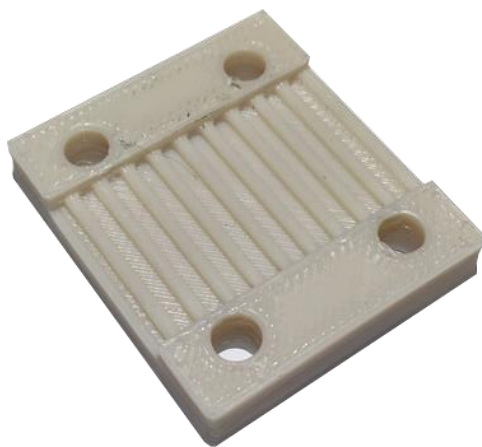
Domeček tvoří spodní část a vrchní část. Do spodní části se vloží ložisko a nasadí se na něj vrchní část. Celá sestava se spojí dvěma šrouby po stranách obou částí a uchyty se na příslušné místo základny. Na obr. 32 je domeček sestaven i s ložiskem.



Obr. 32 Domeček pro ložisko

Protikusy pro upevnění řemenu

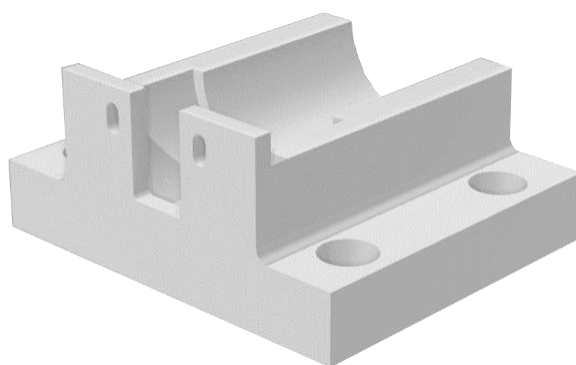
Díly slouží ke spojení konců řemene s manipulační částí a protizávažím. Profil zubů je HTD 3M. Na obr. 33 je fotografie protikusu.



Obr. 33 Protikus k řemenu

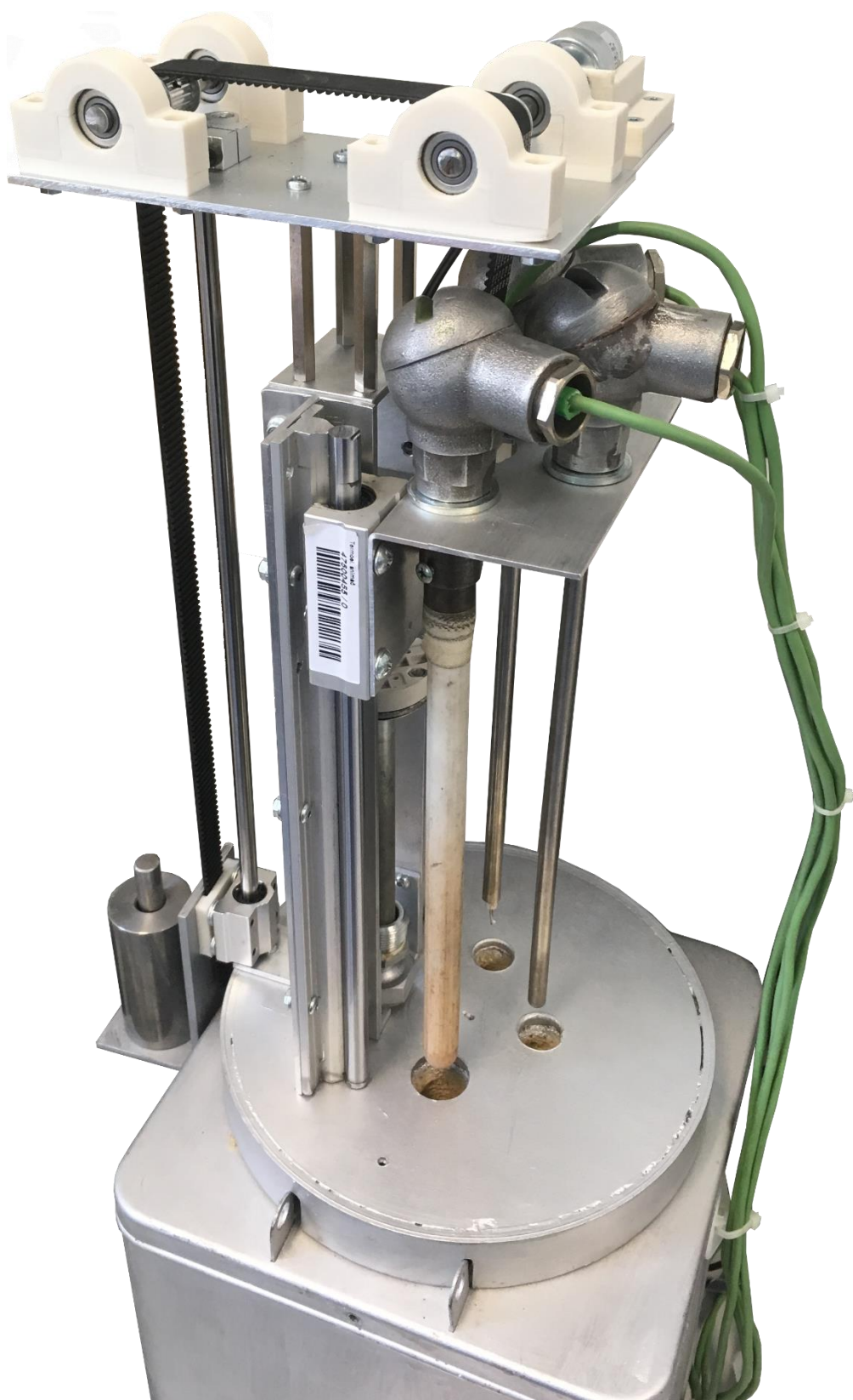
Uchycení motoru

Do tohoto komponentu je vložen motor a je uchycen čelně pomocí dvou šroubů, které doléhají do převodovky. Na obr. 34 je 3D model dílu.



Obr. 34 Uchycení motoru

Modernizovaná úloha má původní základ s rozšířením o lineární pohon, který je sestaven z uvedených komponentů. Fotografie kompletního konstrukčního řešení je na obr. 35. Protizávaží je v případě modifikace možno jednoduše vyměnit nebo vyvážit podle potřeb.



Obr. 35 Modernizovaná měřicí úloha

15 Závěr

Závěrem bych chtěl zhodnotit dosažené výsledky této práce. Automatický posun termočlánků do pece je ovládán z obslužné aplikace dvěma tlačítky s označením směru a uživatel není nucen manuálně zasahovat do pracoviště, jak tomu bylo doposud, čímž jsem odstranil hlavní nedostatek úlohy. Tato modernizace výrazně přispěla k automatizaci a pohodlnosti procesu měření. Pro tento bod práce byl využit lineární pohon. Algoritmus pro detekci ustálení měřených teplot s každou nově naměřenou hodnotou neustále porovnává aktuální a předešlé hodnoty v časovém rozdílu, který je nastaven na dvacet sekund, čímž je ošetřena falešná detekce ustálení v případě, že před dosažením ustáleného stavu, má teplota velice pomalý růst. Tímto algoritmem je uživatel upozorněn na konec přechodového děje oteplovací nebo ochlazovací křivky a nemusí vizuálně kontrolovat hodnoty teplot v grafu, aby vyhodnotil konec měření dle vlastního úsudku. Ustálená teplota však není nikdy konstantní a kolísá v určitém rozsahu, který uživatel může nastavit jako parametr při vyhodnocování ustálení, standardně je 0,2% z maxima. Ukládání dat do MySQL databáze je prováděno průběžně, z čehož plyne, že v případě náhlého selhání aplikace nebo výpadku elektrické energie, je riziko ztráty dat minimální. Před samotným měřením si uživatel zvolí název své tabulky, do které se budou data zapisovat. Tím se zajistí maximální přehlednost v databázi při používání měřicí úlohy vícero uživateli. V prostředí phpMyAdmin je možnost exportu naměřených dat do paměti počítače nebo lze zvolit přímé vykreslení průběhu teploty do grafu, což usnadňuje dosavadní práci s daty v Excelu. PID regulátor definuje střidu pro PWM řízení topného tělesa pece, na základě zpětné vazby v podobě měření teploty čtvrtým termočlánkem, který je permanentně umístěn v peci. Takto je zajištěno udržování teploty na požadované hodnotě v minimálním rozsahu kolísání oproti dvoustavovému řízení, což je důležité pro vývoj měření. Externí periferie WDT, která běží na platformě Arduino Nano, kontroluje na svém digitálním vstupu přítomnost náběžné nebo sestupné hrany každých 500ms. Přestane-li obslužná aplikace vysílat předem definované pulsy, WDT pomocí relé odpojí pec od napájení. Tímto je vyřešena ochrana pec před přehřátím. Obslužná aplikace přestane vysílat pulsy i tehdy, kdy měřená teplota v peci přesáhne dovolené maximum. Uživatel tedy nemusí být v průběhu měření přítomen a zároveň je zvýšená bezpečnost. Modernizaci bych shrnul jako několik zautomatizovaných procesů, které umožňují uživateli pohodlné ovládání měřicí úlohy.

Během vytváření této práce jsem došel k několika poznatkům. Chci upozornit na možné problémy s knihovními funkcemi, se kterými jsem se potýkal při vytváření tabulky v MySQL databázi přes vývojové prostředí LabVIEW. Řešením je vytvoření tabulky pomocí skriptového příkazu, nikoliv pomocí knihovní funkce. Při vytváření algoritmu pro detekci ustálení teplot jsem vycházel z teoretických předpokladů a zároveň z experimentálního měření. Zde je důležité vycházet z informací konkrétní úlohy, neboť teoretický předpoklad nemusí vždy odpovídat skutečnosti. Při modelování komponentů pro 3D tisk je nutné si uvědomit, že výsledný tvar musí být přizpůsoben technologii tisku v závislosti na použitém materiálu. Lámaní kolmých spojů se dá předejít vhodným zaoblením.

Návrh na zlepšení

Koncové spínače jsou provedeny pouze mechanicky na desce plošného spoje řídicího modulu. Tímto navrhuji propojit koncové spínače se SW, což zajistí dodatečnou informaci o poloze termočlánků. Dalším nedostatkem měřicí úlohy je ruční manipulace s poklopem pece, který zabraňuje sálání tepla z pece a ovlivňování měřené teploty ještě před zasunutím termočlánků do pece. Zde navrhuji aplikovat servopohon ovládaný z obslužné aplikace. Při tomto řešení je nezbytné propojení koncových spínačů se SW, neboť by mohlo dojít ke kolizi termočlánků s poklopem.

Literatura

- [1] Jak převádět mezi Kelviny, stupni Celsia a stupni Fahrenheita. *WikiHow* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.wikihow.cz/Jak-převádět-mezi-Kelviny,-stupni-Celsia-a-stupni-Fahrenheita>
- [2] Kelvin. *Diktátor* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.diktatorek.cz/Scholasticus/Matematika/Aritmetika/Prevody-jednotek/Prevody-jednotek-jednotky-SI-kelvin.html>
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] ČERNÝ, Miloš. *Termoelektrické články pro měření teploty*. 2. vydání. Praha 9 - Běchovice: Ústav pro výzkum a využití paliv, 1989. ISBN 80-85101-00-9.
- [5] MÁŠA, Pavel. Přechodné děje: Přechodné děje 1. řádu v časové oblasti. In: *CVUT* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo2/files/lectures/P67.pdf>
- [6] MEJZLÍK, Michal. *NÁVRH A TVORBA LABORATORNÍ ÚLOHY S PELTIEROVÝM ČLÁNKEM* [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15693. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav elektroenergetik. Vedoucí práce Ing. Jan Macháček.
- [7] MACH, Jiří. *Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61817/F3-DP-2015-Mach-Jiri-Nouzove%20napajeci%20zarizeni%20s%20termoelektrickym%20generátorem.pdf>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze fakulta elektrotechnická katedra mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
- [8] BEZSTAROSTI, Jiří. Tranzistor polopate. In: *RoboDoupě* [online]. 27.12.2011 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2012/01/tranzistor_polopate.pdf
- [9] HYRŠ, Jan. MĚŘENÍ TEPLoty TERMOČLÁNKY. Brno, 2012. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.
- [10] Seebeck. Converter [online]. Bureš, ©2002 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>
- [11] TOPOL, Jan. Chyby při měření teplot termočlánky. Panenské Břežany: Výzkumný ústav kovů, [1975].
- [12] LASÁK, Pavel. LabView úvod. *Pavel.lasakovi* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://pavel.lasakovi.com/znalosti/elektrotechnicky-sw/labview-uvod/>
- [13] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. Začínáme s LabVIEW. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [14] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. Allendale, NJ: National Technology & Science Press, 2013. ISBN 9781934891087.
- [15] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabView advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, c2007. ISBN 978-0-8493-3325-5.
- [16] ČÁPKA, David. Lekce 1 - MySQL krok za krokem: Úvod do MySQL a příprava prostředí. In: *Itnetwork* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/mysql/mysql-tutorial-uvod-a-priprava-prostredi>

- [17] NOVÁK, David. *ČASOVÁ KONSTANTA TEPELOMĚRŮ* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor verejne.php?file_id=126756. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Štěpán Foral
- [18] MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ: Měření teploty. In: *LISTY CUKROVARNICKÉ a ŘEPAŘSKÉ* [online]. Praha: Karel Kadlec, 2016 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2016/PDF/260-265.pdf
- [19] MORCINEK, Tomáš. Přenosná teplotní komora pro automobil [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76950/F3-BP-2018-Morcinek-Tomas-Prenosna%20teplotni%20komora%20pro%20automobil.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Doporučená literatura

- [20] MIKYŠKA, Ladislav. Termoelektrické články. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 152 s. Malá elektrotechnická knihovna; sv. 24
- [21] ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
- [22] VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [23] TRAVIS, Jeffrey a Lisa K. WELLS. LabVIEW for everyone. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. ISBN 9780130650962.

Seznam příloh

Označení	Název	Specifikace
I.	LabVIEW software	Příloha v IS EDISON.
II.	Arduino Nano software	Příloha v IS EDISON.